

电工与电子技术基础

左伟平 主 编
肖姑冬 副主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书主要介绍电工与电子技术中的基本概念和基本原理。全书共 10 章, 主要内容包括直流电路、正弦交流电路、半导体器件、放大电路及集成放大器、直流稳压电源、数字电路基础知识、组合逻辑电路、时序逻辑电路、脉冲波形的产生与变换、D/A 转换与 A/D 转换。

根据职业学校的人才培养要求, 本书主要以现代电工与电子技术的基础知识和基本技能为主线, 本着“实用、够用”的原则, 着重培养学生实际应用能力, 每章均配有适量的习题, 以培养和提高学生的实践动手能力和综合素质。

本书内容编排灵活, 可以根据不同的专业选择教学内容, 因而本书适用面较广, 可作为职业学校和技工学校电子电工、机电一体化、数控加工、汽车维修等相关专业的教学用书, 也可作为相关专业的工程技术人员培训教材和参考用书。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有, 侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

电工与电子技术基础/左伟平主编. —北京: 电子工业出版社, 2016. 12

创新型人才培养“十三五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 121 - 30390 - 6

I. ①电… II. ①左… III. ①电工技术—中等专业学校—教材②电子技术—中等专业学校—教材
IV. ①TM ②TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 277783 号

策划编辑: 张剑 (zhang@phei.com.cn)

责任编辑: 靳平

印 刷:

装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787 × 1 092 1/16 印张: 9.5 字数: 243.2 千字

版 次: 2016 年 12 月第 1 版

印 次: 2016 年 12 月第 1 次印刷

定 价: 29.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010)88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询服务方式: zhang@phei.com.cn。

前 言

本书是在现代职业教育（特别是职业学校教学改革和实践）的基础上，依据中等职业学校《电工与电子技术基础课程教学大纲》编写而成的。在内容取舍上主要以现代电工与电子技术的基础知识和基本技能为主线，本着“实用、够用”的原则，以培养学生实际应用能力为目的，在保障科学性的前提下选择课程内容，突出了教材的重点，概念清晰，实用性强。本书可作为职业学校和技工学校电子电工、机电一体化、数控加工、汽车维修等相关专业的教材。

本书在内容安排上，以培养学生的工作能力为目的，充分将基础知识的讲解和思考练习有机结合，使能力培养贯穿于整个教学过程。本书内容编排比较灵活，可以根据不同的专业和不同的需求来选择教学内容，因而本书适用面较广。全书共分三大部分，10章。第一部分是电工技术基础部分，包括第1章直流电路、第2章正弦交流电路；第二部分是模拟电子技术基础，包括第3章半导体器件、第4章放大电路及集成放大器、第5章直流稳压电源；第三部分是数字电子技术基础，包括第6章数字电路基础知识、第7章组合逻辑电路、第8章时序逻辑电路、第9章脉冲波形的产生与变换、第10章D/A转换与A/D转换等，每章末都配有小结和习题。

在编写本书的过程中，编者遵循循序渐进的原则，力求突出新知识、新技术、新工艺和新方法，着重培养学生的创新意识和实际动手操作能力。本教材的特点是理论联系实际，概念清晰，逻辑性强，用物理现象说明原理，减少了复杂的数学公式推导和计算。文字通俗易懂，便于教学和自学。

本书由江西赣州技师学院左伟平任主编，肖姑冬任副主编。其中，第1章至第3章由肖姑冬编写，第4章至第10章由左伟平编写，全书由左伟平统稿。

由于本书编写时间仓促，加上编者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请使用本教材的师生和读者提出宝贵意见，以便修订完善。

编 者

目 录

第 1 章 直流电路	1
1.1 电路及其基本物理量	1
1.1.1 电路及电路图	1
1.1.2 电路的三种工作状态	2
1.1.3 电流	3
1.1.4 电压、电位和电动势	4
1.1.5 电阻和电阻定律	5
1.1.6 电功和电功率	6
1.2 电路的基本定律	7
1.2.1 欧姆定律	7
1.2.2 电阻的串联与并联	8
1.2.3 基尔霍夫定律	10
1.3 直流电路的分析计算	11
1.3.1 支路电流法	11
1.3.2 电路中各点电位计算	12
1.3.3 电压源、电流源及其等效变换	13
第 2 章 正弦交流电路	17
2.1 正弦交流电的基本概念	17
2.1.1 正弦交流电的三要素	18
2.1.2 正弦交流电的三种表示方法	21
2.2 交流电路中的三种基本元件	22
2.2.1 纯电阻电路	23
2.2.2 纯电感电路	24
2.2.3 纯电容电路	27
2.3 RLC 串联正弦交流电路	29
2.3.1 RLC 串联电路的电压和电流的关系	29
2.3.2 RLC 串联电路的三种性质	30
2.3.3 RLC 串联电路的功率	31
2.3.4 线圈和电容并联电路及功率因数的提高	33
2.4 三相交流电路	34
2.4.1 三相对称电源的产生	34
2.4.2 三相电源的连接	35

2.4.3	三相负载的连接	36
2.4.4	三相电路的功率	39
2.5	安全用电	40
2.5.1	电流对人体的伤害	40
2.5.2	触电的种类和形式	41
2.5.3	安全用电措施	41
2.5.4	安全用电常识	42
第3章	半导体器件	46
3.1	半导体二极管	46
3.1.1	半导体二极管的结构、类型	46
3.1.2	半导体二极管的伏安特性	47
3.1.3	半导体二极管的主要参数及用途	47
3.2	半导体三极管	49
3.2.1	三极管的结构和符号	49
3.2.2	三极管的电流放大作用	50
3.2.3	三极管的伏安特性曲线	50
3.2.4	三极管的主要参数	52
3.3	晶闸管	52
3.3.1	普通晶闸管	52
3.3.2	双向晶闸管	54
第4章	放大电路及集成放大器	57
4.1	基本共射放大电路	57
4.1.1	电路组成	57
4.1.2	电路的工作原理	58
4.1.3	放大电路的非线性失真	60
4.2	多级放大电路和反馈放大电路	61
4.2.1	多级放大电路	61
4.2.2	放大电路中的负反馈	63
4.2.3	正弦波振荡电路	66
4.3	功率放大器	69
4.3.1	概述	69
4.3.2	射极输出器	69
4.3.3	互补推挽功率放大器	70
4.4	集成运算放大器	71
4.4.1	差动放大电路	71
4.4.2	集成运算放大器的组成、结构、主要参数及工作特点	72
4.4.3	集成运算放大器的应用	74
第5章	直流稳压电源	80
5.1	整流滤波电路	80

5.1.1	单相整流电路	80
5.1.2	滤波电路	83
5.2	稳压电路	85
5.2.1	硅稳压管稳压电路	85
5.2.2	三端集成稳压器	86
5.3	晶闸管可控整流电路	88
5.3.1	单相半波可控整流电路	88
5.3.2	单相可控桥式整流电路	89
第6章	数字电路基础知识	93
6.1	数字信号与数字电路的基本概念	93
6.1.1	数字信号与数字电路	93
6.1.2	数制与码制	94
6.2	逻辑代数基础	96
6.2.1	逻辑代数的基本运算	96
6.2.2	逻辑函数及表示方法	98
6.2.3	逻辑代数的基本定律及逻辑函数的化简	99
6.3	逻辑门电路	101
6.3.1	分立元件门电路	101
6.3.2	集成 TTL 门电路	103
6.3.3	使用 TTL 门电路应注意的事项	105
第7章	组合逻辑电路	107
7.1	组合逻辑电路的基础知识	107
7.1.1	组合逻辑电路的特点及逻辑功能的表示方法	107
7.1.2	组合逻辑电路的分析与设计	107
7.2	加法器	110
7.2.1	半加器	110
7.2.2	全加器	111
7.3	编码器	112
7.3.1	二进制编码器	112
7.3.2	二进制优先编码器	113
7.3.3	二—十进制编码器	114
7.4	译码器	115
7.4.1	二进制译码器	116
7.4.2	二—十进制译码器	116
第8章	时序逻辑电路	119
8.1	时序逻辑电路的基础知识	119
8.1.1	时序逻辑电路的特点及逻辑功能的表示方法	119
8.1.2	时序逻辑电路的分类	119
8.2	触发器	120

8.2.1	基本 RS 触发器	120
8.2.2	时钟控制的触发器	121
8.3	计数器	124
8.3.1	二进制计数器	124
8.3.2	十进制计数器	126
8.4	寄存器	127
8.4.1	数码寄存器	127
8.4.2	移位寄存器	128
第 9 章	脉冲波形的产生与变换	132
9.1	555 定时器的构成及工作原理	132
9.2	555 定时器的应用	133
9.2.1	用 CC7555 构成的单稳态触发器	133
9.2.2	用 CC7555 构成的多谐振荡器	135
9.2.3	用 CC7555 构成的施密特触发器	136
第 10 章	D/A 转换与 A/D 转换	138
10.1	D/A 转换器	138
10.1.1	权电阻网络 D/A 转换器	138
10.1.2	D/A 转换器的主要参数	139
10.2	A/D 转换器	139
10.2.1	A/D 转换的一般步骤	139
10.2.2	A/D 转换器的工作原理	140
10.2.3	A/D 转换器的主要参数	141

第1章 直流电路

【主要内容】

- ☺ 电路的基本概念。
- ☺ 电路的基本物理量。
- ☺ 电路的基本定律。

【重点和难点】

- ☺ 电流、电压电位、电动势的概念。
- ☺ 欧姆定律和基尔霍夫定律。
- ☺ 直流电路的分析和计算。

1.1 电路及其基本物理量

1.1.1 电路及电路图

1. 电路

在日常生活中，把一个灯泡通过开关、导线和干电池直接连起来，就组成了一个照明电路，如图 1-1 所示。当合上开关时，电路中就有电流通过，灯泡就发光。工厂的动力用电中，电动机通过开关、导线和电源连接起来，组成动力电路。当电源接通时，电动机就转起来。这种把各种电气设备和元件，按一定方式连接起来构成的电流通路称为电路。简单地讲，电路就是电流通过的路径。

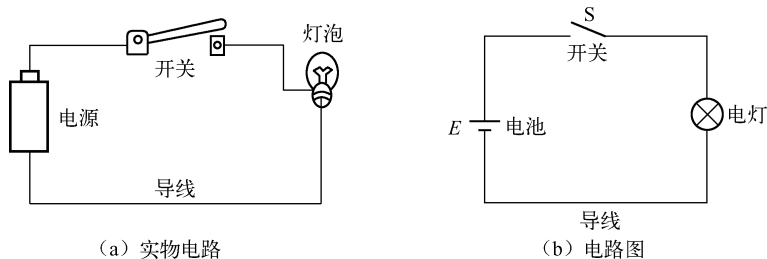


图 1-1 照明电路

电路通常由电源、负载、开关和导线等基本部分组成。

【电源】把其他形式的能量转变成电能的装置。发电机、干电池等都是电源。发电机把机械能转换成电能，干电池把化学能转换成电能。

【负载】把电能转变成其他形式能量的装置。电灯、电动机等都是负载。电灯将电能转变成光能，电动机把电能转变成机械能。

【导线和开关】用于连接电源和负载的元件。开关是控制电路接通和断开的装置。

2. 电路图

为了便于分析、研究电路，通常将电路的实际元件用图形符号表示，画出其电路模型图，如图 1-1（b）所示。这种用统一规定的图形符号画出的电路模型图称为电路图。

常用电路元件符号见表 1-1。

表 1-1 常用电路元件符号

元 件 名 称	电 路 符 号	元 件 名 称	电 路 符 号	元 件 符 号	电 路 符 号
电 池		电 感		电 压 表	
电 压 源		电 容		电 流 表	
电 阻		电 灯		开 关	
二 极 管		熔 断 器		接 地	

1. 1. 2 电路的三种工作状态

1. 通路

通路是指在电路中，处处连通的电路。能构成电流的流通、形成闭合回路的电路（也就是电流能从电源正极流出，经过负载，再从负极流进）。电路中开关闭合时的工作状态称为通路状态，如图 1-2（a）所示。必须注意，处于通路状态的各种电气设备的电压、电流、功率等数值不能超过其额定值。

2. 断路

断路，又称为开路。电路中某一处因中断，没有导体连接，电流无法通过，导致电路中电流消失，这种工作状态称为断路状态，如图 1-2（b）所示，此状态一般对电路无损害。电路中开关打开时的工作状态即为开路状态。在生产实践中，设备之间、设备与导线之间因接触不良或接点松动也容易使电路形成断路。

3. 短路

电源未经过任何负载而直接由导线接通成闭合回路，如图 1-2（c）中 a、b 两点直接连在一起，这种工作状态称为短路状态。短路的电流比正常工作时大得多，易造成电路损坏、电源瞬间损坏，如温度过高会烧坏导线、电源等。所以，应严防电路发生短路。

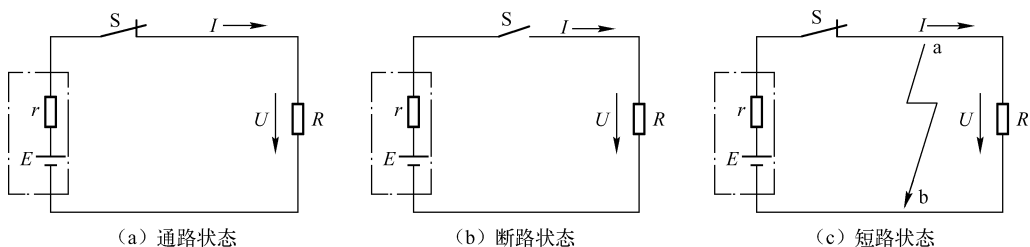


图 1-2 电路的三种工作状态

1.1.3 电流

1. 电流的形成

在金属导体中存在着大量的电子。金属原子的内层电子被原子核紧紧地束缚着，不能自由地运动。而原子的外层电子受原子核的束缚力较弱，容易脱离原子核的束缚，自由地运动。这些自由运动的电子称为自由电子。金属中的自由电子做定向移动就形成电流。

一般情况下，导体内的自由电子是处于不规则的运动状态。如果在导体两端加一个电场，则导体内的自由电子受到电场力的作用做定向运动就形成了电流。

在某些液体或气体中，电流则是正离子或负离子在电场力作用下做定向移动形成的。

2. 电流的大小和方向

电流的大小取决于在一定时间通过导体横截面的电荷量多少。我们用电流强度表示电流的大小，电流强度简称电流，用符号 I 表示。设在时间 t 内通过导体横截面的电荷量是 Q ，则电流为

$$I = \frac{Q}{t}$$

在国际单位制中，电流的基本单位是安培（A）。如果每秒钟内通过导体截面的电量为 1 库仑（C）时，则电流是 1 安培（A）。常用电流单位还有千安（kA）、毫安（mA）、微安（ μA ）等，其关系如下：

$$1\text{kA} = 10^3\text{A} \quad 1\text{mA} = 10^{-3}\text{A} \quad 1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A}$$

在不同的导电物质中，形成电流的运动电荷可以是正电荷，也可以是负电荷，甚至两者都有，规定以正电荷定向移动的方向为电流方向。

电流有直流电和交流电两种，大小和方向不随时间变化的电流称为直流电。大小和方向随时间改变的电流称为交流电。图 1-3（a）所示是直流电的波形图，图 1-3（b）所示是交流电的波形图。

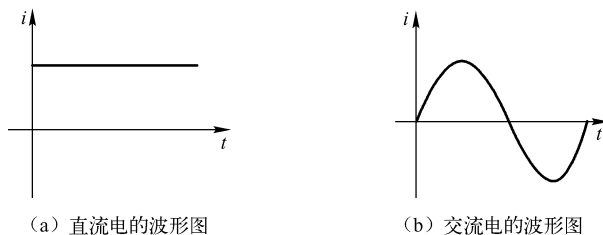


图 1-3 直流电和交流电的波形图

3. 电流密度

根据工作电流的大小,安全实用地选择导线的横截面积(粗细),是我们工作经常遇到的。选择横截面积过大的导线,造成经济浪费。选择横截面积过小的导线,会形成安全隐患。怎样合理选择呢?我们就要了解电流密度这个概念。

电流密度就是电流在导体横截面上均匀分布时,该电流与导体横截面的比值。其单位为安培每平方毫米,记作 A/mm^2 ,一般用 J 表示,即

$$J = I/S$$

一般我们通过查询资料会了解到各导电物体的电流密度参数,这样也就能非常方便计算出电路所用导线的横截面积。

【例 1-1】 某照明线路的工作电流为 24A,求应采用多粗的铜导线?(铜导线的电流密度为 $6\text{A}/\text{mm}^2$ 。)

解: $J = I/S = 24/6 = 4(\text{mm}^2)$



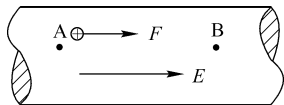
【知识拓展】

导线允许通过的电流因导体横截面面积不同而不同,一般情况下,横截面面积为 1mm^2 的铜导线允许通过 6A 的电流;横截面面积为 2.5mm^2 的铜导线允许通过 15A 的电流;依次类推,横截面面积为 4mm^2 的铜导线允许通过 24A 的电流;当导线中通过的电流超过其允许值时,导线就会发热,严重时导线就会烧焦造成严重的事故,所以我们在选用导线时,必须考虑用电器的功率,并通过计算电路中的电流来确定选用合适的导线。

1.1.4 电压、电位和电动势

1. 电压

在电路中电荷之所以能定向移动,是由于电场力作用的缘故。如图 1-4 所示,电场力把正电荷从导体的 A 端移到导体 B 端,电场力对正电荷做功,正电荷所具有的电势能减小,从而把电能转换成其他形式的能。



电场力 F 把正电荷从 A 端移到 B 端所做的功 W_{AB} 与被移动的电荷量 Q 的比值称为 A、B 两端间的电压,用 U_{AB} 表示,则

图 1-4 电压的定义

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{Q}$$

由上式可知, A、B 两端间的电压在数值上等于电场力把单位正电荷从 A 端移到 B 端所做的功。

在国际单位制中,电压的单位是伏特(V)。常用单位还有千伏(kV)、毫伏(mV)和微伏(μV)等,它们之间的关系是

$$1\text{kV} = 10^3\text{V}$$

$$1\text{mV} = 10^{-3}\text{V}$$

$$1\mu\text{V} = 10^{-6}\text{V}$$

电压不但有大小也有方向,电压的实际方向为正电荷的运动方向,即电压的方向是由电

源的正极到负极。在电路分析中，经常要选定一个方向作为电压的参考方向，在参考方向下电压计算为正，说明电压的实际方向与参考方向相同；电压计算为负时，电压的参考方向与实际方向相反。

2. 电位

在电路分析时，经常用到电位这个物理量，以便分析各点之间的电压。如图 1-5 所示，在电路中任选一点（如 O 点）作为参考点，参考点的电位为零，则某点（如 A 点）到参考点电压就称为该点的电位，用符号 U_A 表示，即 $U_A = U_{AO}$ 。如果 A、B 两点的电位分别为 U_A 、 U_B ，则 $U_{AB} = U_A - U_B$ 。因此，两点间的电压就是该两点的电位之差。电压的实际方向是由高电位点指向低电位点，所以电压又称为电压降。

3. 电动势

如图 1-6 所示，在电场力的作用下，a 极板上的正电荷沿着导线通过灯泡到达 b 极板，与 b 极板上的负电荷中和。正、负两极上的电荷都将逐渐减少，两极之间的电压将逐渐降低，正、负电荷完全中和后，两极之间电压为零，电流中断。

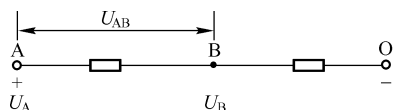


图 1-5 电压和电位

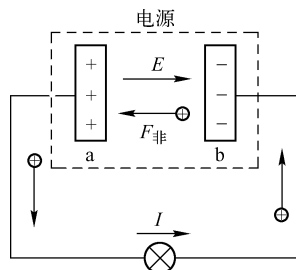


图 1-6 电源的电动势

为了得到持续不断的电流，极板间就必须有一种非电场力能将正电荷从负极源源不断地移到正极。这个任务是由电源来完成的。在电源内部，由于其他形式能量的作用，产生一种对电荷的作用力，称为电源力。正电荷在电源力（ $F_{\text{非}}$ ）的作用下，从低电位移向高电位，从而保持 a 极板的正电荷和 b 极板的负电荷恒定不变，使电源两端保持电位差。不同的电源中，电源力的来源不同，电池中的电源力是化学作用产生的，发电机的电源力则是电磁作用产生的。

电源力在移动正电荷的过程中做功，把其他形式的能量转化为电能。为了衡量电源力做功的能力，我们引入电动势这个物理量。在电源内部，电源力将单位正电荷从电源负极移到正极所做的功称为电源的电动势，用符号 E 表示，即

$$E = \frac{W_{ba}}{Q}$$

电动势的单位是 V，方向由电源负极指向正极。

1.1.5 电阻和电阻定律

1. 电阻

当电流通过金属导体时，做定向移动的自由电子会与金属中的带电粒子发生碰撞，可见导体对电流有阻碍作用。电阻就是反映导体对电流阻碍作用大小的物理量，用符号 R 表示，

国际单位是欧（ Ω ）。常用单位有千欧（ $k\Omega$ ）和兆欧（ $M\Omega$ ）等，它们之间的关系为

$$1k\Omega = 10^3\Omega \qquad 1M\Omega = 10^6\Omega$$

2. 电阻定律

导体存在着电阻，那么导体电阻的大小与哪些因素有关呢？实验证明，导体的电阻与导体的长度成正比，与导体的截面积成反比，还与导体的材料有关。其大小由下式计算为

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

式中， l 的导体长度单位为 m ； S 为导体截面积，单位为 m^2 ； ρ 是导体的电阻率，单位为 Ω 。表 1-2 列出了几种常见导体材料的电阻率。

表 1-2 几种材料在 20℃时的电阻率

材 料		电阻率/ $\Omega \cdot m$	主 要 用 途
纯金属	银	1.6×10^{-8}	导线镀银
	铜	1.6×10^{-8}	各种导线
	铝	1.6×10^{-8}	各种导线
	钨	5.3×10^{-8}	电灯灯丝、电器触点
	铁	1.0×10^{-7}	电工材料
合金	锰铜（85% 铜、12% 锰、3% 镍）	4.4×10^{-7}	标准电阻、滑线电阻
	康铜（54% 铜、46% 镍）	5.0×10^{-7}	标准电阻、滑线电阻
	铝铬铁电阻丝	1.2×10^{-6}	电炉丝
半导体	硒、锗、硅等	$10^{-4} \sim 10^7$	制造各种晶体管、晶闸管
绝缘体	赛璐珞	10^8	电器绝缘
	电木、塑料	$10^{10} \sim 10^{14}$	电器外壳、绝缘支架
	橡胶	$10^{13} \sim 10^{16}$	绝缘手套、鞋、垫

电工材料的导电性能可分为导体、绝缘和半导体三类。

具有良好的导电性能的材料称为导体，导电性能很差的材料称为绝缘体。导电性能介于导体和绝缘体之间的材料称为半导体。

1.1.6 电功和电功率

1. 电功

电流流过负载时，负载将电能转换成其他形式的能量，这一过程称为电流做功，简称电功，用字母 W 表示，计算公式为

$$W = UIt$$

在国际单位制中，功的单位为焦耳（J）。

2. 电功率

电流在单位时间内所做的功，称为电功率，简称功率，用字母 P 表示。

$$P = \frac{W}{t} = UI$$

在国际单位制中，功率的单位为瓦特（W），常用单位有千瓦（kW）、毫瓦（mW）等。电能的计算：

$$1 \text{ 度电} = 1 \text{ 千瓦时} (\text{kW} \cdot \text{h}) \quad 1 \text{ 度电} = 1000 \text{ W} \times 3600 \text{ S/H} = 3.6 \times 10^6 \text{ 焦耳} (\text{J})$$



【想一想】

已知家庭日光灯的功率是 40W，电视机的功率是 100W。在 1 小时内它们谁消耗的电多？



【知识拓展】

用电器所消耗的电能量多少可以用电能表来测量，一般在居民用电电路中，采用家用单相电能表来记录用电量。它在电路中的连接原则是“1、3”孔接进线；“2、4”孔接出线。

1.2 电路的基本定律

1.2.1 欧姆定律

1. 部分电路欧姆定律

在图 1-7 中，当在电阻两端加上电压时，电阻中就有电流通过。实验证明：流过电阻的电流 I 与电阻两端的电压成正比，与电阻成反比，此结论称为部分电路欧姆定律，即

$$I = U/R \text{ 或 } I = U/R$$

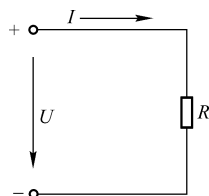


图 1-7 部分电路

【例 1-2】一个标有“220V 550W”的电水壶，在额定电压下工作，电水壶正常工作时通过它的电流是 2.5A，求其电阻。

解： $R = U/I = 220/2.5 = 88 (\Omega)$

【例 1-3】如果人体电阻的最小值为 800Ω ，通过人体的电流达到 50mA 时，会引起呼吸器官的麻痹，不能自主摆脱电源，试求人体的安全工作电压。

解：由欧姆定律可得

$$U = IR = 50 \times 10^{-3} \times 800 = 40 (\text{V})$$

所以人体的安全工作电压就在 40V 以下。



【想一想】

有的人会说电路断路时 $I=0\text{A}$ ，由于 $U=IR$ 得出电源电压 $U=0\text{V}$ ，这是否正确？为什么？

2. 全电路欧姆定律

全电路是指含有电源的闭合回路，如图 1-8 所示。

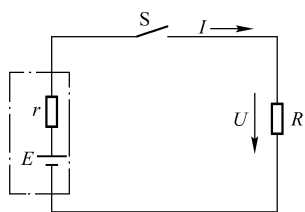


图 1-8 全电路

图 1-8 中的虚框内表示是一个电源。电源一般都是有电阻的，我们称为内电阻，用 R_0 表示。其与电源是一个整体，为了分析方便，我们把它单独画了出来。当开关 S 闭合后，电阻 R 两端产生电压 U 。同样，在 R_0 两端也产生电压 U_0 ，即 $U_0 = IR_0$ 。经分析可知，电阻 R 的电压即端电压 U 应该等于电源减去自己产生的内压降 U_0 ，即 $U = E - U_0$ 。

把 $U_0 = IR_0$ 和 $U = IR$ 代入上式可得

$$I = E / (R + R_0)$$

由此可知，在一个闭合回路中，电路的电流 I 与电源 E 成正比，与电路的外电阻 R 和内电阻 R_0 之和成反比，这就是全电路欧姆定律。

【例 1-4】 图 1-4 中，电源电动势 $E = 6\text{V}$ ，内阻 $R_0 = 0.5\Omega$ ，外接负载电阻 $R = 9.5\Omega$ ，求端电压 U 和内压降 U_0 。

解： $I = E / (R + R_0) = 6 / (9.5 + 0.5) = 0.6(\text{A})$

$$U = IR = 0.6 \times 9.5 = 5.7(\text{V})$$

$$U_0 = IR_0 = 0.6 \times 0.5 = 0.3(\text{V})$$

$$\text{或 } U_0 = E - U = 6 - 5.7 = 0.3(\text{V})$$

【例 1-5】 图 1-4 中，电源电动势开路电压为 6V ，外接负载电阻 R 为 9.5Ω ，其端电压 U 为 5.7V ，求电源的内电阻 R_0 。

解： 电源电动势开路电压即电源电动势的电压 E

$$\text{内压降 } U_0 = E - U = 6 - 5.7 = 0.3(\text{V})$$

$$\text{电路电流 } I = U / R = 5.7 / 9.5 = 0.6(\text{A})$$

$$\text{内电阻 } R_0 = U_0 / I = 0.3 / 0.6 = 0.5(\Omega)$$

$$\text{或 } (R + R_0) = E / I = 6 / 0.6 = 10\Omega$$

$$\text{内电阻 } R_0 = 10 - R = 10 - 9.5 = 0.5(\Omega)$$

由例 1-4 和例 1-5 可知，灵活运用欧姆定律，电路参数可由多种方法求解。

1.2.2 电阻的串联与并联

1. 电阻的串联及分压

把两个或两个以上电阻依次连接，组成一条无分支电路，这样的连接方式称为电阻的串联，如图 1-9 所示。

电阻串联有以下性质。

(1) 串联电路中流过每个电阻的电流相等，即

$$I = I_1 = I_2 = \cdots = I_n$$

式中, 脚标 1, 2, \cdots , n 分别代表第 1, 第 2, \cdots 第 n 个电阻。

(2) 串联电路两端的总电压等于各电阻两端的分电压之和, 即

$$U = U_1 + U_2 + \cdots + U_n$$

(3) 串联电路的等效电阻 (总电阻) 等于各串联电阻值之和, 即

$$R = R_1 + R_2 + \cdots + R_n$$

根据欧姆定律 $U = IR$, $U_1 = I_1 R_1$, $U_2 = I_2 R_2$ 及串联电路性质 (1) 可得

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}, \frac{U_1}{U} = \frac{R_1}{R}$$

上式表明, 在串联电路中, 各电阻上分配的电压与电阻值成正比。

若两个电阻串联, 已知串联电阻总电压 U 及电阻 R_1 、 R_2 , 则有

$$U_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U, \quad U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U$$

上式即为串联电路的分压公式。

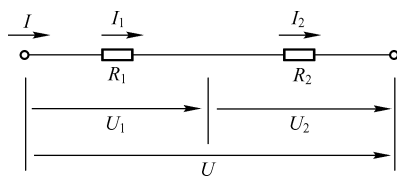


图 1-9 串联电路

2. 电阻的并联及分流

两上或两个以下的电阻接在电路中相同的两点之间, 承受同一电压, 这样的连接方式称为电阻的并联, 如图 1-10 所示。

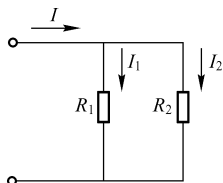


图 1-10 两个电阻并联电路

电阻并联具有以下性质。

(1) 并联电路中各电阻两端的电压相等, 且等于电路两端的总电压, 即

$$U = U_1 = U_2 = \cdots = U_n$$

(2) 并联电路的总电流等于流过各电阻的电流之和, 即

$$I = I_1 + I_2 + \cdots + I_n$$

(3) 并联电路的等效电阻 (总电阻) 的倒数等于各电阻的倒数之和, 即

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n}$$

由欧姆定律和并联电路性质 (1) 可得

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}, \quad \frac{I_1}{I} = \frac{R}{R_1}$$

上式表明, 在并联电路中, 通过各支路的电流与支路的电阻值成反比。

若已知两个电阻 R_1 、 R_2 并联, 并联电路的总电流为 I , 则两个电阻中的分电流为

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I, \quad I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I$$

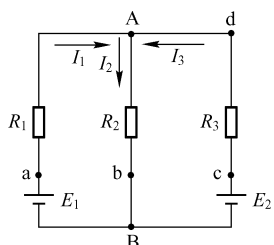
上式称为两电阻并联时的分流公式。

1.2.3 基尔霍夫定律

无法用串、并联关系进行简化的电路称为复杂电路。复杂电路不能直接用欧姆定律求解，可用基尔霍夫定律来分析。

1. 有关的电路名词

【支路】每一段不分支的电路称为支路。如图 1-11 所示，AaB、AbB、AdcB 都是支路，但 Ad 不是支路。



【节点】三条和三条以上的支路的连接点称为节点。如图 1-11 所示，A 点和 B 点都是节点。

【回路】电路中任一闭合路径称为回路。如图 1-13 所示，AaBbA、AdcBaA、AdcBbA 都是回路。

【网孔】在回路内部不含有支路的，这种回路称为网孔。如图 1-11 所示，AaBbA、AdcBbA 都是网孔，但 AdcBaA 不是网孔。

图 1-11 电路名词附图

2. 基尔霍夫电流定律

【基尔霍夫定律（简称 KCL）】

在任一时刻，流入一个节点的电流之和等于从该节点流出的电流之和，即

$$\sum I_i = \sum I_o$$

【例 1-6】对图 1-11 所示电路，列出节点的电流方程。

解：先选定各支路的参考方向，如图 1-11 所示。

根据 KCL 可得

$$\text{节点 A} \quad I_1 + I_3 = I_2$$

3. 基尔霍夫电压定律

【基尔霍夫电压定律（简称 KVL）】

对于电路中的任一回路，沿回路绕行方向的各段电压的代数和等于零，即

$$\sum U = 0$$

如图 1-12 所示，回路 abcdea 表示复杂电路中的其中一个回路（其余回路没有画出来）。各支路电流的参考方向如图 1-12 所示，选定绕行方向为 a→b→c→d→e→a。各部分电压为

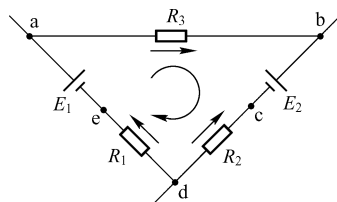


图 1-12

$$U_{ab} = I_3 R_3$$

$$U_{bc} = E_2$$

$$U_{cd} = -I_2 R_2$$

$$U_{de} = I_1 R_1$$

$$U_{ea} = -E_1$$

则 $\sum U = U_{ab} + U_{bc} + U_{cd} + U_{de} + U_{ea} = 0$

即 $I_2 R_3 + E_2 - I_2 R_2 + I_1 R_1 - E_1 = 0$

应用公式 $\sum U = 0$ 列回路电压方程时，首先选定一个回路绕行方向，电阻上电流方向与绕行方向一致，则该电压取正，反之取负；电源电压的方向与绕行方向一致时，则该电源电压取正，反之取负。

【例 1-7】如图 1-13 所示为某电路中的一个回路，试列出其回路电压方程。

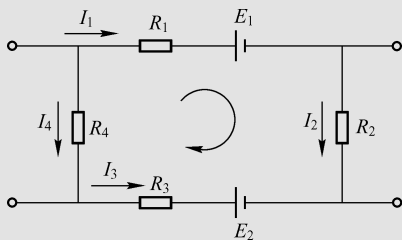


图 1-13

解：标出各支路电流的参考方向和绕行方向，如图 1-13 所示，则回路电压方程为

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 - I_3 R_3 - I_4 R_4 = -E_1 + E_2$$

1.3 直流电路的分析计算

1.3.1 支路电流法

支路电流法就是以各支路电流为未知量，应用基尔霍夫定律列出方程式，联立求解支路电流。图 1-14 所示是一台直流发电机和蓄电池并联供电的电路。已知两个电源的电动势为 E_1 、 E_2 ，内阻为 r_1 、 r_2 ，负载电阻为 R_3 ，求各支路电流。

这个电路有三条支路，即有三个未知电流，要解出三个未知量，需要三个独立方程式联立求解。利用基尔霍夫定律可列出所需要的方程组。

首先假设各支路电流方向与绕行方向如图 1-14 所示，根据 KCL 可得

$$\text{对节点 A} \quad I_1 + I_2 = I_3$$

如果电路有几个节点，根据 KCL 可列出 $n - 1$ 个独立节点电流方程式，我们可以试着列出 B 点电流方程式，可以发现与 A 点的电流方程式相同。

根据 KVL，列出网孔的电压方程：

$$\text{对网孔 I} \quad I_1 r_1 - I_2 r_2 = E_1 - E_2$$

$$\text{对网孔 II} \quad I_2 r_2 + I_3 r_3 = E_2$$

只要解出上述三个联立方程，就可求得三条支路电流。

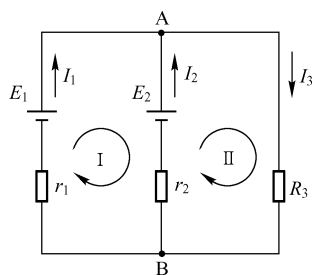


图 1-14

【例 1-8】在图 1-14 中，已知 $E_1 = 7\text{V}$ ， $r_1 = 0.2\Omega$ ， $E_2 = 6.2\text{V}$ ， $r_2 = 0.2\Omega$ ， $R_3 = 3.2\Omega$ ，求各支路电流和负载的端电压。

解：根据图 1-14 中标出的各电流方向，根据基尔霍夫定律列出方程为

$$\begin{cases} I_1 + I_2 = I_3 \\ I_1 r_1 - I_2 r_2 = E_1 - E_2 \\ I_2 r_2 + I_3 R_3 = E_2 \end{cases}$$

代入数据得

$$\begin{cases} I_1 + I_2 = I_3 \\ 0.2I_1 - 0.2I_2 = 7 - 6.2 \\ 0.2I_2 + 3.2I_3 = 6.2 \end{cases}$$

解方程得

$$\begin{cases} I_1 = 3(\text{A}) \\ I_2 = -1(\text{A}) \\ I_3 = 2(\text{A}) \end{cases}$$

电流 I_2 为负值，说明 I_2 的实际方向与参考方向相反，而实际方向应从 A 到 B，这时蓄电池处于负载状态。

负载两端电压 $U_3 = I_3 R_3 = 2 \times 3.2 = 6.4(\text{V})$

1.3.2 电路中各点电位计算

1. 电位的计算

电位计算的基本步骤如下。

(1) 选定零电位。零电位也是参考点，可以任意指定，但以计算方便为原则。

(2) 选择路径。要计算某点的电位，选择这点到零电位的路径。该点的电位就是此路径上全部电压和电动势的代数和。路径可以任意选择，每一条路径所求出的同一点电位是一样的。选择路径的原则也要从计算方便简单出发。

(3) 分析电路。电阻上的电压正负根据电阻上电流方向来确定，电流流进的一端为正极，流出的一端为负极。电动势的正负是直接标出的，一般容易判定。

【例 1-9】图 1-15 中，已知 $U_{AF} = 60\text{V}$ ， $U_B = 80\text{V}$ ， $U_{FC} = 10\text{V}$ ，求 C、D 点的电位和 U_{BA} 的电压。

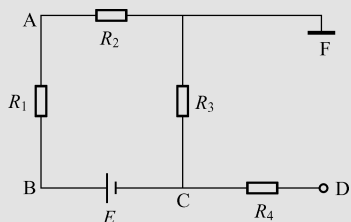


图 1-15

解：F 点为参考点，即零电位 $U_F = 0\text{V}$ 。

由 $U_{FC} = U_F - U_C$ 可知，C 点的电位 $U_C = U_F - U_{FC} = 0 - 10 = -10\text{V}$ ；从电路可知，C、D 两点之间的电阻 R_4 无电流流过，所以 C、D 间的电位不升也不降，因此 D 点的电位与 C 点一样，即 $U_D = -10\text{V}$ 。

由 $U_{AF} = U_A - U_F$ 可知，A 点的电位 $U_A = U_{AF} + U_F = 60 + 0 = 60(\text{V})$

因此， $U_{BA} = U_B - U_A = 80 - 60 = 20(\text{V})$

2. 电路中两点间电压的计算

计算电路中任意两点电压的方法：一种是电位求电压，即分别求出两点的电位后，根据电压等于电位之差的关系，求出电压；另一种方法是分段法，即将两点之间的电压分为若干小段，各小段电压的代数和即为所求电压。

【例 1-10】 图 1-16 中，已知 $E_1 = 8\text{V}$ ， $E_2 = 16\text{V}$ ， $E_3 = 12\text{V}$ ， $R_2 = 10\Omega$ ，求 A、B 两点的电压。

解：(1) 电位求电压法。

设 D 为参考点，则 $U_A = -E_1 = -8(\text{V})$

$$U_B = -E_2 - E_3 = -16 - 12 = -28(\text{V})$$

$$\text{则 } U_{AB} = U_A - U_B = -8 - (-28) = 20(\text{V})$$

(2) 分段法。

$$U_{AB} = -E_1 + E_2 + E_3 = -8 + 16 + 12 = 20(\text{V})$$

(注意：电动势由正极指向负极的方向与 A 经 E_1 、 E_2 、 E_3 绕行到 B 方向一致时取正。)

通过计算可知，两种方法的计算结果是一样的。

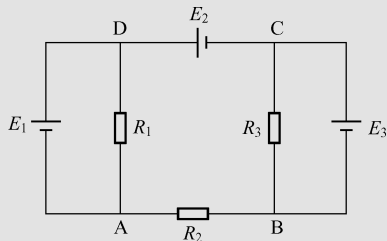


图 1-16

1.3.3 电压源、电流源及其等效变换

掌握电压源和电流源的概念及它们之间的等效变换，能使某些复杂电路的分析计算大为简化。

1. 电压源

用一个恒定电动势 E 与内阻 r 串联表示的电源称为电压源。电压源的符号如图 1-17 (a) 或图 1-17 (b) 所示。

当电压源向负载 R 输出电压时，如图 1-17 (c) 所示，电源的端电压 U 与输出电流 I 之间的关系为

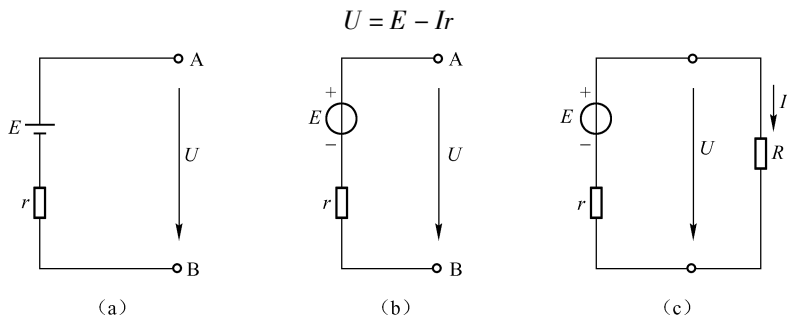


图 1-17 电压源的符号及输出

上式中，如果内阻 $r = 0$ ，那么不管负载变动时输出电流 I 如何变化，电源始终输出恒定的电压 E ，把内阻 $r = 0$ 的电压源称为理想电压源，其符号如图 1-18 所示。

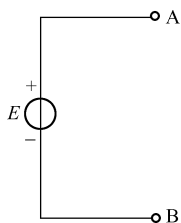


图 1-18 理想电压源符号

2. 电流源

用一个恒定电流 I_s 与内阻 r 并联表示的电源称为电流源。电流源的符号如图 1-19 (a) 所示。

当电流源向负载 R 输出电流时，如图 1-19 (c) 所示。电流源的端电压 U 与输出电流 I 的关系为

$$I = I_s - \frac{U}{r}$$

如果电流源内阻 r 为无穷大，则不论由负载变化引起的端电压如何变化，它所输出的电流恒定不变，其值为 I_s ，内阻 $r \rightarrow \infty$ 的电流源称为理想电流源，其符号如图 1-19 (b) 所示。

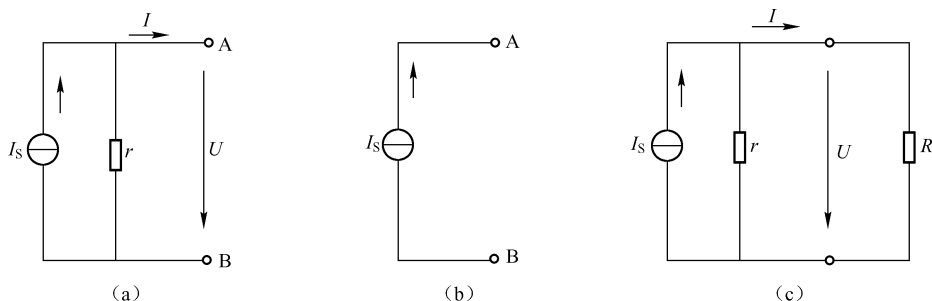


图 1-19 电流源的符号及输出

3. 电压源与电流源的等效变换

当一个电压源与一个电流源的外特性相同时，对外电路来说，这两个电源是等效的，也就是说，在满足一定条件下，两种电源之间能够实现等效变换。

由于电压源的 U 与 I 的关系为

$$U = E - Ir$$

即

$$I = \frac{E}{r} - \frac{U}{r}$$

又由于电流源的 U 与 I 的关系为

$$I = I_s - \frac{U}{r'}$$

为了保证电源的外特性完全相同（即输出的电流、电压一样），等式右侧的两项对应相等，那么，把电压源等效变成电流源，则有

$$\begin{cases} I_s = \frac{E}{r} \\ r' = r \end{cases}$$

如果把电流源等效变成电压源，则有

$$\begin{cases} E = I_s r' \\ r = r' \end{cases}$$



【注意】

两种电源等效变换时，应注意以下几点。

- ☺ 等效变换仅仅是对外电路而言，对于电源内部并不等效。
- ☺ 在变换过程中，电压源的电动势 E 的方向和电流源的电源 I_s 的方向保持一致。
- ☺ 理想电压源与理想电流源不能进行等效变换。



【本章小结】

(1) 电流流径的路径称为电路。电路由电源、负载和导线组成。电路有三种工作状态：通路、开路、短路。

(2) 电荷的定向移动形成电流。电流的大小用电流强度表示。电流的实际方向为正电荷定向移动方向，在电路分析时一般指定电流的参考方向。

(3) 电压是衡量电场力做功能力的物理量，电路中 A、B 两点间的电压，等于电场力把单位正电荷由原点移到 B 点所做的功。电压的实际方向也是正电荷定向移动方向，但在电路分析时也常常指定参考方向。电场力将单位正电荷从电场中的某点移动到参考点所做的功，称为该点的电位，单位是 V。参考点的电位等于零。

(4) 电阻是反映导体对电流阻碍作用大小的物理量。导体电阻的大小与导体的几何尺寸和材料的关系为 $R = \rho l / S$ ，电阻单位为 Ω 。各种材料根据其导电性能可分为导体、绝缘体和超导体。

(5) 欧姆定律说明了电阻中的电压和电流的关系，在电流和电压的关系参考方向下，有 $U = RI$ 。

(6) 电功率是指电流在单位时间内所做的功。

(7) 电阻的串联和并联是电路的基本形式，串联的特点是各电阻中的电流相同，具有分压作用；并联的特点是各电阻上的电压相同，具有分流的作用。

(8) 基尔霍夫定律 (KCL) 确定了节点上各支路电流的关系： $\sum I = 0$ ；基尔霍夫电压定律 (KVL) 确定了回路中各支路电压的关系，沿回路绕行方向有 $\sum U = 0$ 。



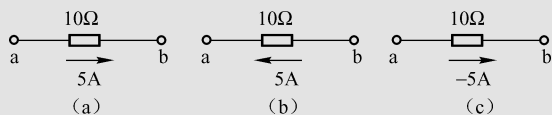
【习题】

- 1.1 怎样理解电位高低的含义？电位与电压有什么异同？
- 1.2 试述电动势的定义、单位和方向。
- 1.3 电动势与电压有何异同？
- 1.4 在电源中，电动势和电压之间有何关系？
- 1.5 如果 5s 内通过导线截面的电量是 10C，电流是多少？如果通过导线截面的电流是 0.1A，则 1min 将有多少库仑的电量通过导线截面？
- 1.6 已知一根铜导线长 1000m，截面积为 10mm^2 ，求导线的电阻。若同样尺寸的铝导线其电阻为多大？

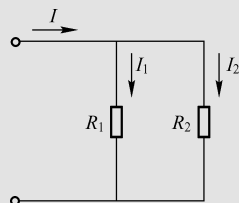
1.7 一个 $200\text{V}/100\text{W}$ 的灯泡，如果误接在 110V 的电源上，此时灯泡的功率是多少？若误接在 380V 的电源上，此时灯泡的功率为多少？是否安全？

1.8 求图题 1-1 所示电路中的 U_{ab} 。

1.9 在图题 1-2 所示电路中，已知 $R_1 = 100\text{k}\Omega$ ， $I = 3\text{mA}$ ， $I_1 = 2\text{mA}$ ，问 I_2 及 R_2 是多少？



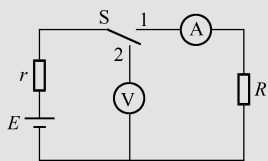
图题 1-1



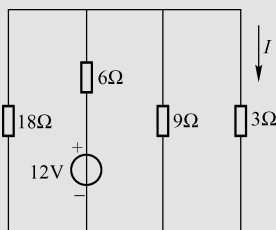
图题 1-2

1.10 图题 1-3 所示，当开关 S 扳向 2 时，电压表读数为 6.3V ，当开关扳向 1 时，电流表读数为 3A 。已知 $R = 2\Omega$ ，求电源的电动势和内阻。

1.11 电路如图题 1-4 所示，用等效电源法求 3Ω 电阻中的电流 I 。



图题 1-3



图题 1-4

第2章 正弦交流电路

【主要内容】

- ☺ 正弦交流电的基本概念和表示方法。
- ☺ 正弦交流电路中电阻、电感和电容元件的电压和电流的关系。
- ☺ 正弦交流电路中的功率。
- ☺ RLC 串联正弦交流电路的分析及功率因素的提高。
- ☺ 三相交流电及三相交流电路。
- ☺ 安全用电基本知识。

【重点和难点】

- ☺ 正弦交流电的三要素。
- ☺ 电阻、电感和电容元件的性质。
- ☺ 正弦交流电路的分析与计算。
- ☺ 安全用电基本知识。

2.1 正弦交流电的基本概念

在现代工农业生产及日常生活中，广泛使用交流电。与直流电相比，交流电在其电能的产生、输送和使用方向都有很大的优越性。首先，交流电可以利用变压器方便地改变电压。其次，交流电动机比直流电动机结构简单，价格低廉，使用维护方便。再次，交流电可以通过整流、滤波电路变换成直流电。

交流电的电压和电流的大小和方向都随时间做周期性变化。其中，随时间按正弦规律变化的交流电称为正弦交流电。正弦交流电由交流发电机或正弦信号发生器产生。正弦交流电可以用正弦函数的解析式表示，其表达式为

$$U = I_m \sin(\omega t + \varphi)$$

式中的三个常数 ω 、 I_m 和 φ 表示正弦交流电的特征，称为正弦交流电的三要素。

交流电除用函数的解析式表示外，通常还可随时间变化的曲线或波形图表示，如图 2-1 所示。

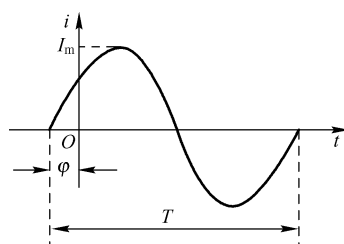


图 2-1 正弦交流电的波形图



【知识拓展】

交流电应用及其广泛，它可以利用变压器把某一数值的交流电压变化成另一数值的电压，从而实现远距离、低损耗、高压输电。另外，交流电动机的结构比直流电动机简单，而且成本低，工作可靠。最大的优点是交流电可以通过整流、滤波电路变换成人们所需的直流电。

2.1.1 正弦交流电的三要素

1. 周期和频率

交流电完成一次周期性变化所需的时间称为交流电的周期，用符号 T 表示，单位是秒 (s)，交流电在 1s 内完成周期性变化的次数称为交流电的频率，用符号 f 表示，单位是赫兹 (Hz)。根据定义，周期和频率互为倒数，即

$$f = \frac{1}{T}$$

我国电力工业标频率为 50Hz，习惯上称为工频。它的周期是 0.02s。

周期和频率是反映交流电变化快慢的物理量。

交流电变化的快慢，除了用周期和频率表示外，还可以用角频率表示。角频率 (ω) 表示在单位时间内交流电所经历的电角度，即

$$\omega = \alpha/t$$

角频率的单位是弧度/秒，用符号 rad/s 表示。

周期、频率和角频率的关式为

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$



【知识拓展】

我国工业、农业及居民生活使用的交流电的频率为 50Hz (又称为工频)，其周期是 0.02s。但美国、日本等一些国家采用 60Hz 的交流电。

2. 瞬时值、最大值和有效值

交流电在某一时刻的值称为在这一时刻交流电的瞬时值。电动势、电压和电流的瞬时值分别用小写字母 e 、 u 和 v 表示。例如，在图 2-2 中， e 在 t_1 时刻的瞬时值为 e_1 ， t_2 时刻的瞬时值为 E_m ， t_3 时刻的瞬时值为零。

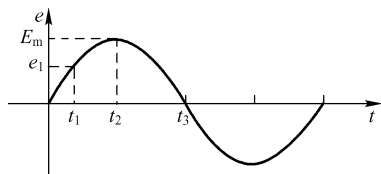


图 2-2 电动势的波形图

交流电最大的瞬时值称为最大值，也称为幅值或峰值。电动势、电压和电流的最大值分别用符号 E_m 、 U_m 和 I_m 表示。在图 2-2 中 e 的最大值为 E_m 。交流电的最大值是交流电在一个周期内所能达到的最大数值，可用来

表示交流电的电流强弱或电压高低，在实际中很有意义。例如，电容器用于交流电路中时所承受的耐压值，就是指最大值，如果交流电最大值超过电容器所能承受的耐压值，那么电容器就有可能被击穿。

交流电的有效值是根据电流的热效应来规定的，让一个交流电流和一个直流电流分别通过阻值相同的电阻，如果在相同时间内产生的热量相等，那么就把这一直流电的数值称为这一交流电的有效值。交流电动势、电压和电流的有效值分别用大写字母 E 、 U 和 I 表示。

计算表明，正弦交流电的有效值与最大值之间的关系为

$$\left. \begin{aligned} E &= \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0.707 E_m \\ U &= \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0.707 U_m \\ I &= \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707 I_m \end{aligned} \right\}$$



【知识拓展】

交流电路中的电压、电流、电动势通常是用有效值来计算的。电器、电机等用电设备的额定电压、额定电流值也是用有效值来表示的。在计算电路的功率时必须要用有效值，但在选择电器设备耐压时必须使用最大值。

3. 相位、初相和相位差

在 $i = I_m(\omega t + \varphi)$ 中的 $\omega t + \varphi$ 称为正弦量的相位角或相位，相位反映了正弦量随时间变化的进程，确定正弦量每一瞬时的状态。

$t = 0$ 时的相位称为初相，即 φ 为初相，其值规定为 $|\varphi| \leq \pi$ 。

两个同频率交流电的相位之差称为相位差。在正弦交流电路中，电压与电流都是同频率的正弦量，分析电路时常常要比较它们的相位差。设电压和电流分别为

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi_u)$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i)$$

则电压与电流之间的相位差为

$$\Delta\varphi = (\omega t + \varphi_u) - (\omega t + \varphi_i) = \varphi_u - \varphi_i$$

值得指出的是：初相的大小与时间起点的选择密切相关，而相位差为初相之差，与时间的起点选择无关。

根据两个同频率交流电的相位差，可以确定两个交流电的相位关系。

如果 $\Delta\varphi = \varphi_u - \varphi_i > 0$ ，那么 u 超前 i ，或者说 i 滞后于 u ，在图 2-3 (a) 中 u 超前 i 60° 。

如果 $\Delta\varphi = \varphi_u - \varphi_i = 0$ ，那么就称这两个正弦量同相，在图 2-3 (b) 中 u 与 i 同相。

如果 $\Delta\varphi = \varphi_u - \varphi_i = 180^\circ$ ，那么就称这两个正弦量反相，在图 2-3 (c) 中 u 与 i 反相。

如果 $\Delta\varphi = \varphi_u - \varphi_i = 90^\circ$ ，那么就称这两个正弦量正交，在图 2-3 (d) 中 u 与 i 正交。

交流电的相位差实际上反映了两个交流电在时间上谁先到达最大值的问题。

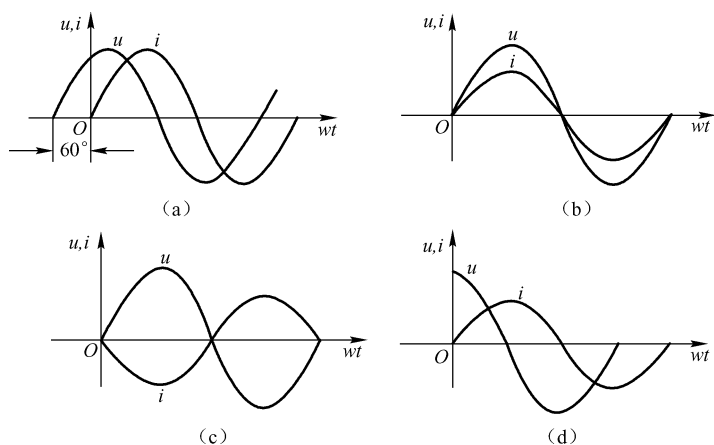


图 2-3 不同相位差的电压与电流的波形

【例 2-1】 已知某正弦电压在 $t=0$ 时，其值 $u(0)=220\text{V}$ ，且已知电压的初相为 45° 。
 $f=50\text{Hz}$ ，求电压的有效值和最大值，并写出电压的瞬时值表达式。

解：设电压为

$$u = U_m \sin(\omega t + 45^\circ)$$

当 $t=0$ 时，有

$$u(0) = U_m \sin 45^\circ = 220(\text{V})$$

故电压的最大值为

$$U_m = \frac{220}{\sin 45^\circ} = 220\sqrt{2}(\text{V})$$

故电压的有效值为

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 220(\text{V})$$

电压的角频率为

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \times 50 = 314(\text{rad/s})$$

电压的瞬时值为

$$u = 220\sqrt{2} \sin(314t + 45^\circ)$$

【例 2-2】 已知两个正弦量分别为 $u = U_m \sin(\omega t - 30^\circ)$ ， $i = I_m \sin(\omega t - 60^\circ)$ 。试问电压与电流的相位差为多少？ u 与 i 哪个超前？超前多少？

解：已知 $\varphi_u = -30^\circ$ ， $\varphi_i = -60^\circ$ ，由此可得电压与电流的相位差为

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_i = -30^\circ - (-60^\circ) = 30^\circ$$

由此可见，电压超前电流 30° 。

2.1.2 正弦交流电的三种表示方法

1. 解析式法

正弦交流电的电动势、电压、电流的瞬时值表达式就是正弦交流电的解析式，即

$$e = E_m \sin(\omega t + \varphi_e)$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi_u)$$

$$v = I_m \sin(\omega t + \varphi_i)$$

三个解析式中都包含了最大值、频率和初相位，根据解析式就可以计算交流电任意瞬时的数值。

2. 波形图法

正弦交流电还可与解析式相对应的正弦曲线来表示。如图 2-4 所示，横坐标表示时间 t 或电角度 ωt ，纵坐标表示交流电的瞬时值。从波形图中可以看出交流电的最大值、周期和初相位。

3. 矢量图表示法

正弦交流电也可以用旋转矢量图表示。如图 2-5 所示，在直角坐标系内，做一个矢量 Oa 。并使其长度与正弦交流电的最大值成比例（图 2-5 中为 E_m ），使 Oa 与 Ox 轴的夹角等于正弦交流电的初相位 φ ，令其按逆时针方向转。这样矢量在任一瞬间与横轴 Ox 的夹角即为正弦交流电的相位 $(\omega t + \varphi)$ ，旋转矢量任一瞬间在纵轴 Oy 的投影 (Oa) 即为正弦交流电的瞬时值，即

$$Oa = e = E_m \sin(\omega t + \varphi)$$

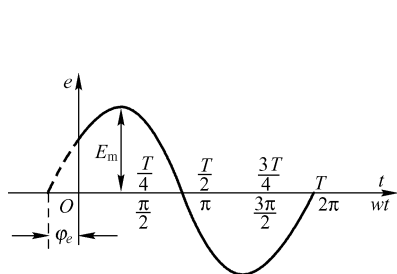


图 2-4 正弦交流电的波形图

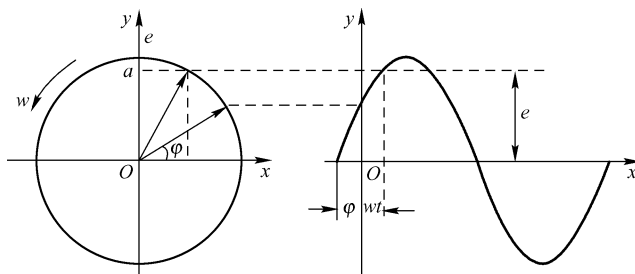


图 2-5 正弦量的矢量表示法

把同频率的交流电画在同一矢量图上时，由于矢量的角频率相同，所以不管其旋转到什么位置，彼此之间的相位关系始终保持不变。因此，在研究同频矢量之间的关系时，只按初相做出矢量，而不必标出角频率，如图 2-6 所示，这样做出的图称为矢量图。

采用矢量图表示正弦交流电，在计算 n 个同频率交流电的和或差时，比解析式和波形图要简单得多，且比较直观，因此它是研究交流电的重要方法之一。

在实际工作中，往往采用有效值矢量图来表示交流电，如图 2-7 所示。

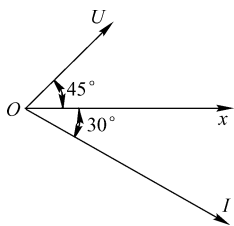


图 2-6 矢量图

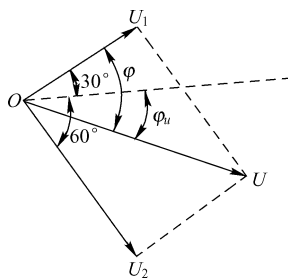


图 2-7 有效值矢量图

【例 2-3】 已知 $u_1 = 3\sqrt{2} \sin(314t + 30^\circ)$, $u_2 = 4\sqrt{2} \sin(314t - 60^\circ)$, 求 $u = u_1 + u_2$ 和 $u' = u_1 - u_2$ 的瞬时值表达式。

解: 根据题意做出矢量图, 如图 2-8 所示。

$$\text{则 } U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5(\text{V})$$

$$\varphi = \arctan \frac{U_2}{U_1} = \arctan \frac{4}{3} = 53^\circ (U_1 \text{ 超前 } U \text{ 的角度})$$

由 $\varphi = \varphi_1 - \varphi_u$ 得

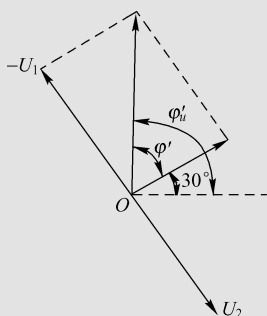


图 2-8

$$\varphi_u = \varphi_1 - \varphi = 30^\circ - 53^\circ = -23^\circ$$

于是可得

$$u = 5\sqrt{2} \sin(314t - 23^\circ)$$

由 $u' = u_1 - u_2 = u_1 + (-u_2)$, 画出矢量图如图 2-8 所示。

$$\text{得 } u' = \sqrt{U_1^2 + U_2^2} = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5(\text{V})$$

$$\varphi' = \arctan \frac{U_2}{U_1} \approx 53^\circ (u' \text{ 超前 } u_1 \text{ 的角度})$$

$$\varphi'_u = \varphi' + \varphi_1 = 53^\circ + 30^\circ = 83^\circ$$

于是可得

$$u' = 5\sqrt{2} \sin(314t + 83^\circ)$$

2.2 交流电路中的三种基本元件

在正弦交流电路中除了电源外, 还有电阻、电感、电容三种不同参数的无源元件。它们在能量转换上具有不同的物理性质。正因为电阻、电感和电容具有不同的物理性质, 就决定了它们在交流电路中起着不同的作用。电流流过电阻元件时要消耗电能并转换成热量。电流流过电感元件时要产生磁场并储存磁场能量。电容的主要性质是电压加在它两端时, 要产生电场并储存电场能。

2.2.1 纯电阻电路

由负载和交流电源组成的电路称为交流电路。若电源中只有一个交变电动势，则称为单相交流电路。与直流电路不同之处是：分析各种交流电路时，不但要确定电路中电压与电流之间的大小关系，而且要确定它们之间的相位关系，同时还要讨论电路中的功率问题。为了分析复杂的交流电路，首先应掌握单一参数（电阻、电感、电容）元件电路中电压和电流的关系，因为其他电路均可看成单一参数元件电路的组合。

交流电路中如果只有线性电阻，这种电路称为纯电阻电路。负载为白炽灯、电炉、电烙铁的交流电路都可近似看成纯电阻电路。

1. 电压与电流的关系

在正弦交流电路中，虽然电压、电流是随时间变化的，但是在每一瞬间，电阻上的电压与电流的关系仍由欧姆定律来确定。如图 2-9 所示为正弦交流电阻电路，电压、电流在关联参考方向下，设电阻两端的电压为

$$u = U_m \sin \omega t$$

根据欧姆定律，可得电阻中的电流为

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t$$

上式表明电压和电流是同频率、同相位的正弦量，其电压、电流有效值（或最大值）的关系仍满足欧姆定律，即

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{或} \quad I_m = \frac{U_m}{R}$$

电压与电流的波形图和相量图如图 2-10 所示。

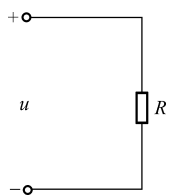


图 2-9 电阻电路

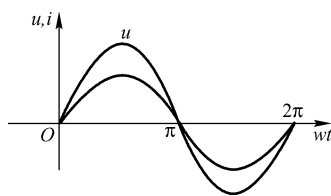


图 2-10 电阻电压与电流的波形图与相量图

2. 电路的功率

电阻中任意瞬间消耗的电功率称为瞬时功率，它等于电压与电流瞬时值的乘积，用小写字母 p 表示：

$$p = ui = U \sqrt{2} \sin \omega t I \sqrt{2} \sin \omega t = 2UI \sin^2 \omega t = UI - UI \cos 2\omega t$$

瞬时功率随时间变化的规律如图 2-11 所示。由于 $p \geq 0$ ，说明电阻在吸收功率，它是一种耗能元件。

由于瞬时功率是随时间做周期性变化的，因此在电工技术上取它在一个周期内的平均值表示交流电功率的大小，称为平均功率，用大写字母 P 表示：

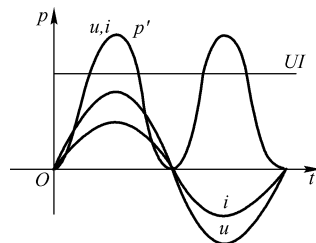


图 2-11

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

因为平均功率是实际消耗功率，故又称为有功功率，简称功率，单位是瓦特（W）。例如，我们日常说灯泡功率为 40W，电炉功率为 1000W，电阻的功率为 5W 等，都是指平均功率。

【例 2-4】 已知某电阻的电压 $u = 220\sqrt{2}\sin(314t + 30^\circ)$ ，电阻 $R = 2.2\text{k}\Omega$ 。求电阻中的电流 I 和功率 P 。

解： 设电压与电流为关联参考方向，则电压有效值为

$$U = 220(\text{V})$$

而电流有效值为

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220}{2200} = 0.1(\text{A})$$

所以

$$i = \sqrt{2} \times 0.1 \sin(314 + 30^\circ) = 0.1\sqrt{2} \sin(314 + 30^\circ)(\text{A})$$

$$P = UI = 220 \times 0.1 = 22(\text{W})$$



【想一想】

为什么说交流电路中电阻是耗能元件？

2.2.2 纯电感电路

由电阻很小的电感线圈组成的交流电路，可近似地看成纯电感电路。

1. 电感元件的性质

当电流流过线圈时，如图 2-12 所示，将产生自感磁通 Φ 。设线圈有 N 匝，如果磁通穿过线圈的各匝，则线圈中的自感磁链 $\Phi = N\phi$ 。由于磁通是电流产生的，所以磁链与电流存在一定的关系，在磁通与电流的参考方向符合右手螺旋定则的情况下，我们将自感磁链与产生它的电流之比称为线圈的电感，用 L 表示，即

$$L = \frac{\Phi}{i}$$

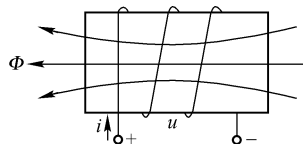


图 2-12 电感线圈

L 的单位是亨利（H），其大小与线圈的形状、匝数、几何尺寸及周围介质有关，当介质为非铁磁物质时， L 为常数，称为线性电感。

我们可以证明电感元件中磁场能量 $W_L = Li^2/2$ 。当电感元件中电流 I 增大时， W_L 增大，此时电能转换成磁场能量，而电感元件从电源吸收能量；反之，当电流 i 减小时， W_L 减小，此时磁场能量转换成电能，即电感元件向电源输送能量。故电感元件是储能元件。

2. 电压与电流的关系

当纯电感电路中有交变电流 i 通过时, 如图 2-13 (a) 所示, 根据电磁感应定律, 线圈 L 上产生的自感电动势为

$$e_L = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

式中, $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 为线圈自感磁链对时间的变化率, 负号表示自感电动势的方向符合楞次定律。对于内阻很小的电源, 其电动势子端电压总是大小相等、方向相反, 所以有

$$u_L = -e_L = L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

该电感 L 中流过的电流为

$$i = I_m \sin \omega t$$

由数学推导可得

$$u_L = \omega L I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = U_L \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

由上式可知, 纯电感电路中, 电压与电流频率相同, 电压 U_L 超前电流 $\pi/2$, 如图 3-13 (b) 和图 3-13 (c) 所示。

在数量上有

$$U_{Lm} = \omega L I_m = X_L I_m \text{ 或 } U = X_L I$$

$$X_L = \omega L = 2\pi f L$$

X_L 称为电感电抗, 简称感抗, 单位为欧姆 (Ω)。

感抗是用来表示电感元件对交流电阻碍作用的一个物理量。其大小取决于电感 L 和电流的频率 f 。对某一线圈而言, f 越高则 X_L 越大, 反之亦然。因此, 电感线圈对交流电具有通低频阻高频的特性。对直流电而言, 由于 $f=0$, 则 $X_L=0$, 电感线圈可视为短路。

另外, 由 $U_{Lm} = X_L I_m$ 和 $U_L = X_L I$ 可知, 交流电压、交流电流的最大值和有效值分别满足欧姆定律。

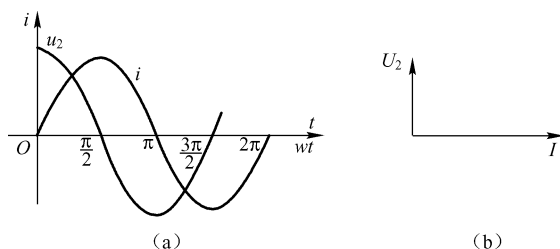


图 2-13 纯电感电路中的电压与电流



【想一想】

在纯电感电路中, 电压超前电流 90° , 这是否说明电感元件上是先有电压后有电流的?

3. 电路的功率

纯电感电路的瞬时功率为

$$P_L = u_L i$$

将 u_L 和 i 代入得

$$P_L = U_{Lm} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \times I_m \sin\omega t = \frac{1}{2} U_{Lm} I_m \sin 2\omega t = UI \sin 2\omega t$$

由上式确定的功率曲线如图 2-14 所示,在第一和第三个 $1/4$ 周期内, P_L 为正值,即电源将电能传给线圈并以磁场能的形式储存于线圈中;在第二和第四个 $1/4$ 周期内, P_L 为负值,即线圈将磁场能转换为电能向电源充电。这样,在一个周期内,纯电感电路的平均功率为零。就是说纯电感电路中没有能量损耗,只有电能和磁场能周期性的转换。因此电感元件是一种储能元件。

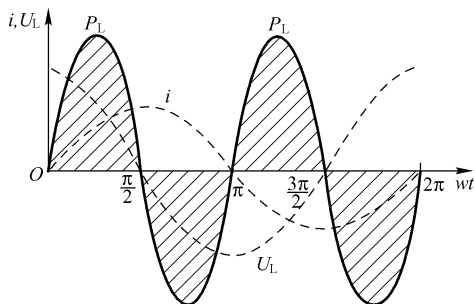


图 2-14 纯电感电路的功率曲线

我们把储能元件中瞬时功率的最大值称为无功功率,用字母 Q 表示。它只反映储能元件和电源之间能量交换的规模。电感元件的无功功率为

$$Q_L = U_L I = X_L I^2 = \frac{U_L^2}{X_L}$$

为了与有功功率相区别,规定无功功率单位为乏 (Var)。

【例 2-5】 在一纯电感电路中, $u_L = 220\sqrt{2} \sin(314t + 30^\circ)$, $L = 0.7\text{H}$ 。求:

- (1) 线圈的感抗;
- (2) 流过线圈电流的瞬时值表达式;
- (3) 电路的无功功率;
- (4) 电压与电流的矢量图。

解: (1) $X_L = \omega L = 314 \times 0.7 = 220(\Omega)$

$$(2) I = \frac{U}{X_L} = \frac{220}{220} = 1(\text{H})$$

在纯电感电路中,电流滞后电压 90° , 因此

$$\varphi_i = \varphi_u - 90^\circ = -60^\circ$$

于是得

$$i = \sqrt{2} \sin(314t - 60^\circ)$$

$$(3) Q_L = U_L I = 220 \times 1 = 220(\text{Var})$$

(4) 电压与电流的矢量图如图 2-15 所示。

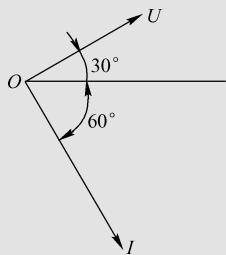


图 2-15



【知识拓展】

如果电感线圈中不含有导磁介质，这种电感线圈称为空心电感或线性电感。如果电感线圈中含有导磁介质，这种电感线圈称为非线性电感。在电路中用于“通直流、阻交流”的线圈称为低频扼流圈；用于“通低频、阻高频”的电感线圈称为高频扼流圈。

2.2.3 纯电容电路

1. 电容元件的性质

电容器是存储电荷的容器，在电路中也是一种储能元件。凡是用绝缘介质隔开而又相互邻近的金属导体，就构成了一个电容器。当电容器的两极板间加上电压后，极板上将充有电荷。如图 2-16 所示，两极板之间就会形成电场，存储着电场能量。

绝大多数电容器都是线性的，其极板上的电荷正比于极板间的电压，即

$$Q = Cu \quad \text{或} \quad C = \frac{Q}{u}$$

式中的 C 就是电容器的电容量，简称电容，单位为法拉，用字母 F 表示。实际中常用的单位是微法 μF ($1\mu F = 10^{-6} F$) 或皮法 pF ($1pF = 10^{-12} F$)。电容代表一个电容器存储电荷的能力。在相同电压下，电容越大，电容器所存储的电荷越多。

2. 电容电压与电流的关系

当电容器所加电压发生变化时，其连接线内将连续流过充电或放电电流。根据电流的定义可得电容器的充放电电流为

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = C \frac{\Delta u_c}{\Delta t}$$

上式表明电容器电流正比于电容电压的变化率。

设加在电容器两端的电压 U_c 为

$$u_c = U_{cm} \sin \omega t$$

由数学推导可得

$$i = \omega C U_{cm} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = I_m \sin \left(t + \frac{\pi}{2} \right)$$

由上式可知，在纯电容电路中，电流与电压频率相同，且电流 i 超前电压 U_c 90° ，如图 3-16 (b) 和图 3-16 (c) 所示。

在数量上

$$I_m = \omega C U_{cm} = \frac{U_{cm}}{X_c} \quad \text{或} \quad I = \frac{U}{X_c}$$

式中，

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

X_c 称为容抗，单位是欧姆 (Ω)。容抗是用来表示电容对电流阻碍作用大小的一个物理

量。容抗的大小与频率及电容成反比。当电容一定时, 频率 f 越高则容抗 X_C 越小, 反之亦然。因此电容器对交流电具有通高频阻低频的特性。在直流电路中, 因 $f=0$, 容抗 X_C 无限大。这表明, 电容接入直流电路时, 在稳定状态下, 处于断路状态。

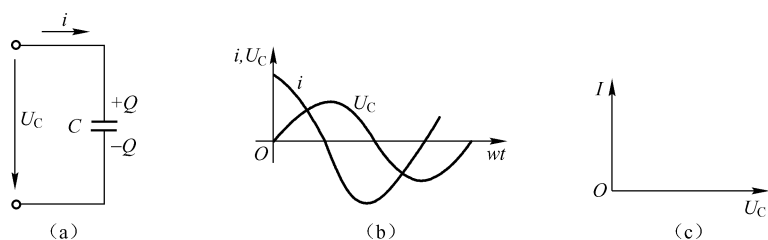


图 2-16 纯电容电路中电流与电压的关系

与纯电感电路相似, 在纯电容电路中, 交流电压和交流电流的最大值和有效值分别满足欧姆定律。



【想一想】

在实际电路中, 隔直电容器的容量一般都较大, 而旁路电容器的容量一般都较小, 你知道这是为什么吗?

3. 电路的功率

采用和纯电感电路相似的方法, 可以求得纯电容电路的瞬时功率为

$$P_C = u_C i = U_C I \sin 2\omega t$$

它与纯电感电路中瞬时功率表达式形式上完全一样, 其变化曲线如图 2-17 所示。

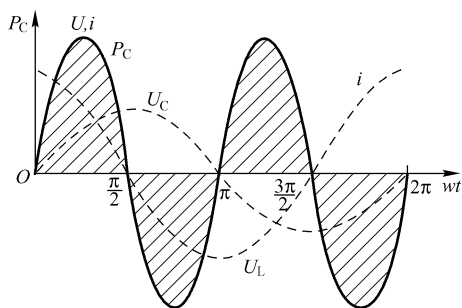


图 2-17 纯电容电路的瞬时功率

从瞬时功率 P 的曲线图中可以看出, 在第一和第三个 $1/4$ 周期内 $P > 0$, 电容器吸取电源能量并以电场能的形式存储起来; 在第二和第四个 $1/4$ 周期内 $P < 0$, 电容器向电源释放能量。和纯电感电路一样, 瞬时功率的最大值定义为电路的无功功率, 用以表示电容和电源交换能量的规模。电容的无功功率为

$$Q_C = U_C I = I^2 X_C = \frac{U_C^2}{X_C}$$

Q_C 的单位也是乏 (Var)。

【例 2-6】已知某纯电容电路两端的电压为 $u = 220\sqrt{2} \sin(314t - 30^\circ)$ ，电容 $C = 15.9\mu\text{F}$ ，试求：

- (1) 电路电流的瞬时值表达式；
- (2) 电路的无功功率；
- (3) 电流与电压的矢量图。

解：(1) $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{3.14 \times 15.9 \times 10^{-6}} \approx 200\Omega$

则 $I = \frac{U}{X_C} = \frac{220}{200} = 1.1(\text{A})$

因此电容电路中，电流超前电压 90° 。

则

$$\varphi_i = \varphi_u + 90^\circ = -30^\circ + 90^\circ = 60^\circ$$

所以

$$i = 1.1\sqrt{2} \sin(314t + 60^\circ)$$

(2) $Q_C = U_C I = 220 \times 1.1 = 242(\text{Var})$

(3) 电流与电压的矢量图如图 2-18 所示。

$$\varphi = \arctan \frac{I_L \sin \varphi_1 - I_C}{I_L \cos \varphi_1} = 25.8^\circ$$

$$\cos \varphi = \cos 25.8^\circ = 0.9$$

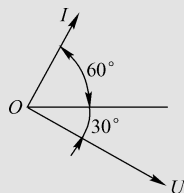


图 2-18

2.3 RLC 串联正弦交流电路

在前面讨论了电阻、电感、电容单一元件的电路，得到每种元件在正弦电源作用下电压与电流的大小和相位关系及功率的特点。在实际电路中，常常由几种元件的组成，如图 2-19 所示为 RLC 串联电路，本节将研究串联电路的电压与电流的关系和电路的功率。

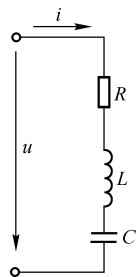


图 2-19

2.3.1 RLC 串联电路的电压和电流的关系

在 RLC 串联电路中，流过各元件的电流相同，为了分析方便，以电流为参考，设 $i = I_m \sin \omega t$ ，由三种元件的电压和电流关系可得

$$\text{电阻电压} \quad u_R = Ri = RI_m \sin \omega t$$

$$\text{电感电压} \quad u_L = X_L I_m \sin(\omega t + 90^\circ)$$

$$\text{电容电压} \quad u_C = X_C I_m \sin(\omega t - 90^\circ)$$

由基尔霍夫定律可知电路的总电压为

$$u = u_R + u_L + u_C$$

用相量表示为

$$U = U_R + U_L + U_C$$

画出电压电流的相量图,如图2-20所示,设 $U_L > U_C$, $U_X = U_L + U_C$ 称为电抗电压,相量图中的 U_R 、 U_X 与 U 组成一个直角三角形,称为电压三角形,如图2-21所示。电压三角形清楚地表示出电阻电压、电抗电压和总电压之间的关系。由相量图可以求得电流和总电压有效值之间的关系为

$$\begin{aligned} U &= \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = \sqrt{(RI)^2 + (X_L I - X_C I)^2} \\ &= I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = I \sqrt{R^2 + X^2} = IZ \end{aligned}$$

其中, $X = X_L - X_C$, 称为电路的电抗,其值可为正,也可为负。

而 $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + X^2}$ 。称为电路的阻抗。它由电阻 R 和电抗 X 组成,在电路中有阻止电流的作用,单位为欧姆。

将电压三角形的每边除以电流,可以得到由 R 、 X 和 Z 构成的直角三角形,称为阻抗三角形,如图2-22所示。它表明了 R 、 X 、 Z 及 φ 之间的关系。

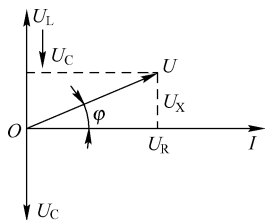


图 2-20 RLC 串联电路的相量图

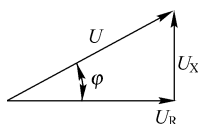


图 2-21 电压三角形

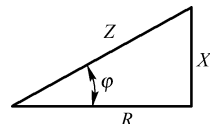


图 2-22 阻抗三角形

由上式和阻抗三角形可得

$$\begin{cases} Z = \frac{U}{I} \\ \varphi = \arctan \frac{X}{R} = \varphi_u - \varphi_i \end{cases}$$

其中, 阻抗 Z 表示了电压有效值与电流有效值之间的大小关系, 我们看到 RLC 串联电路中的电压与电流的有效值符合欧姆定律。 φ 称为阻抗角, 它表示了电压与电流的相位差。

2.3.2 RLC 串联电路的三种性质

由上述分析可知电路的电抗 $X = X_L - X_C$, X 可以为零, 也可以小于零, 还可以等于零。

当 $X > 0$ 时, 而 $X_L > X_C$, 电感的作用大于电容的作用, 此时 $\varphi > 0$, 说明电压超前电流, 称为感性电路, 其相量图如图2-23 (a) 所示。

当 $X < 0$ 时, 即 $X_L < X_C$, 电容的作用大于电感的作用, 此时 $\varphi < 0$, 说明电压滞后电流, 称为容性电路, 其相量图如图2-23 (b) 所示。

当 $X = 0$ 时, 即 $X_L = X_C$, 此时 $\varphi = 0$, 电路中虽然有电感和电容, 但是电压与电流同相, 呈现电阻性, 这是电路的一种特殊工作状态, 称为串联谐振, 其相量图如图2-23 (c) 所示。谐振电路在无线电技术中广泛应用。

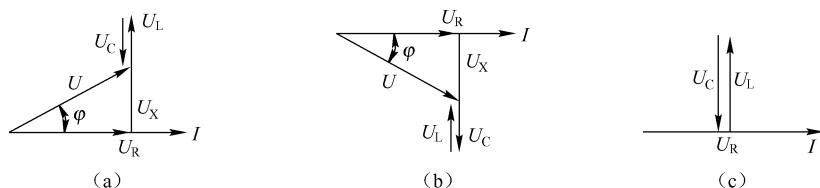


图 2-23 串联电路的相量图

2.3.3 RLC 串联电路的功率

在 RLC 串联电路中, 只有电阻是消耗电能的元件, 所以电路的平均功率为电阻中消耗的功率, 即

$$P = I^2 R = U_R I = UI \cos \varphi$$

其中, $U_R = U \cos \varphi$, 可由电压三角形取得。

电路的无功功率为电抗吸收的功率, 即

$$Q = I^2 X = U_X I = I^2 (X_L - X_C) = Q_L - Q_C = UI \sin \varphi$$

这是无功功率的一般定义式, 由此可见电路中感性无功功率与容性无功功率具有相互补偿的作用, 也就是电感的磁场能量与电容的电场能量相互交换。

我们把正弦交流电路中电压有效值与电流有效值的乘积称为视在功率, 用 S 表示, 即

$$S = UI$$

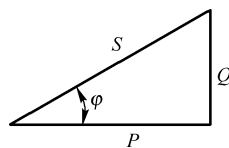
视在功率的单位是伏安 ($V \cdot A$), 这是为了与平均功率相区别。在工程中, 许多电气设备都规定有额定电压和额定电流, 两者的乘积为设备的容量, 显然这也是视在功率, 所以视在功率一般指设备的容量。

由平均功率的表达式可以看出, 电路的平均功率为视在功率与 $\cos \varphi$ 的乘积, $\cos \varphi$ 称为电路的功率因数, 由于 $|\varphi| \leq 90^\circ$, 显然 $\cos \varphi$ 的值在 $0 \sim 1$ 之间。在无功功率表达式中, 我们看到电路的无功功率等于视在功率与 $\sin \varphi$ 的乘积, 由于 φ 在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 之间, 所以无功功率既可为正, 也可为负。工程中常将 $\varphi > 0$ 称为电路吸收无功功率, $\varphi < 0$ 称为电路发出无功功率。

由 P 和 Q 的表达式可知它们与视在功率有以下关系:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

这说明 P 、 Q 和 S 三者之间也是直角三角形的关系, 此三角形称为功率三角形, 如图 2-24 所示。功率三角形可由电压三角形每边同乘以电流得到, 因此功率三角形与电压三角形和阻抗三角形同为相似三角形。



应该指出的是, $S = UI$, $P = UI \cos \varphi = S \cos \varphi$, $Q = UI \sin \varphi = S \sin \varphi$ 图 2-24 功率三角形为电路功率的一般公式, 可以用于所有正弦交流电路的功率计算。

【例 2-7】 RLC 串联后接到电压 $U = 10V$ 、角频率 $\omega = 5000 \text{ rad/s}$ 的正弦交流电源。已知 $R = 7.5 \Omega$, 电感 $L = 6 \text{ mH}$, 电容 $C = 5 \mu\text{F}$, 求电路中的电流和各元件上的电压。

解: 感抗 $X_L = \omega L = 5000 \times 6 \times 10^{-3} = 30 (\Omega)$

$$\text{容抗 } X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{5000 \times 5 \times 10^{-6}} = 40(\Omega)$$

$$\text{电抗 } X = X_L - X_C = 30 - 40 = -10(\Omega)$$

$$\text{阻抗 } Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{7.5^2 + (-10)^2} = 12.5(\Omega)$$

$$\text{阻抗角 } \varphi = \arctan \frac{X}{R} = \arctan \frac{-10}{7.5} = -53.1^\circ$$

电路阻抗角为负值,说明电路为容性,电流相位超前电压 53.1° 。

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{10}{12.5} = 0.8(\text{A})$$

$$U_R = RI = 7.5 \times 0.8 = 6(\text{V})$$

$$U_L = X_L I = 30 \times 0.8 = 24(\text{V})$$

$$U_C = X_C I = 40 \times 0.8 = 32(\text{V})$$

【例 2-8】 已知电阻 $R = 30\Omega$, 电感 $L = 382\text{mH}$, 电容 $C = 40\mu\text{F}$, 串联后接到电压 $u = 220\sqrt{2}\sin(314t + 30^\circ)$ 的电源上, 求电路的 i 、 P 、 Q 和 S 。

解: 感抗 $X_L = \omega L = 314 \times 382 \times 10^{-3} = 120(\Omega)$

$$\text{容抗 } X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314 \times 40 \times 10^{-6}} = 80(\Omega)$$

$$\text{电抗 } X = X_L - X_C = 120 - 80 = 40(\Omega)$$

$$\text{阻抗 } Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{30^2 + 40^2} = 50(\Omega)$$

$$\text{阻抗角 } \varphi = \arctan \frac{X}{R} = \arctan \frac{40}{30} = 53.1^\circ$$

阻抗角为正值,说明电路为感性,电压超前电流 53.1° 。

$$\text{电流有效值 } I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{50} = 4.4(\text{A})$$

$$\text{电流 } i = 4.4\sqrt{2}\sin(314t + 30^\circ - 53.1^\circ) = 4.4\sqrt{2}\sin(314t - 23.1^\circ)$$

$$\text{有功功率 } P = UI\cos\varphi = 220 \times 4.4\cos53.1^\circ = 581(\text{W})$$

$$\text{无功功率 } Q = UI\sin\varphi = 220 \times 4.4\sin53.1^\circ = 774(\text{Var})$$

$$\text{视在功率 } S = UI = 220 \times 4.4 = 968(\text{V} \cdot \text{A})$$



【想一想】

(1) 将灯泡与线圈串联后,分别接到电压相等的直流电源和交流电源上,问灯泡是否一样亮?为什么?

(2) 交流电路的无功功率为何等于感性无功功率与容性无功功率之差?它表示的物理意义是什么?

2.3.4 线圈和电容并联电路及功率因数的提高

电力系统的负载常为感性负载，功率因数一般较低，为了使电力设备的容量能得到充分地利用，减小输出线路的电流，降低线路的功率损耗，常常采用负载两端并联电容器的方法提高功率因数，如图 2-25 所示。

并联电路选电压为参考量，设 $u = U_m \sin \omega t$ ，对于 RL 支路，有感抗 $X_L = \omega L$

$$\text{阻抗 } Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

$$\text{阻抗角 } \varphi_1 = \arctan \frac{X_L}{R} = \arctan \frac{\omega L}{R}$$

RL 支路相量图如图 2-26 所示。电容支路相量图如图 2-27 所示。

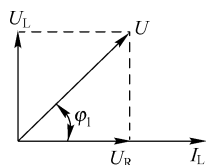


图 2-26 RL 支路相量图

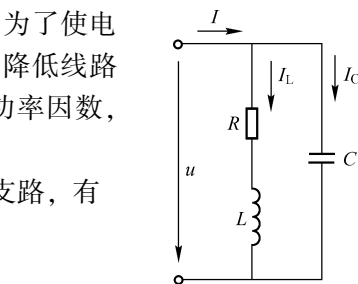


图 2-25 电感与电容并联电路

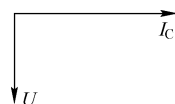


图 2-27 电容支路相量图

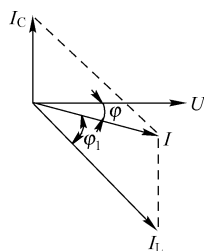


图 2-28

由基尔霍夫定律 (KCL) 得

$$I = I_L + I_C$$

画出相量图如图 2-28 所示。

图 2-28 中， φ 为 U 与 I 的相位差，显然 $\varphi < \varphi_1$ ，即 $\cos \varphi > \cos \varphi_1$ 。因此，感性负载并联电容器后提高了功率因数。

由相量图 2-28 很容易推出总电流为

$$I = \sqrt{(I_L \cos \varphi_1)^2 + (I_L \sin \varphi_1 - I_C)^2}$$

总电流滞后电压的相位差为

$$\varphi = \arctan \frac{I_L \sin \varphi_1 - I_C}{I_L \cos \varphi_1}$$

【例 2-9】 有一个感性负载，功率 $P = 20\text{kW}$ ， $\cos \varphi_1 = 0.6$ ，电源电压 $U = 380\text{V}$ ， $f = 250\text{Hz}$ ，求：

(1) 电路中的电流；

(2) 若并联一个 $374\mu\text{F}$ 的电容，这时电路中总电流、功率因数各为多少？

解：(1) 电路中的电流为

$$I_L = \frac{P}{U \cos \varphi_1} = \frac{20 \times 10^3}{380 \times 0.6} = 87.7 (\text{A})$$

(2) 并联电容后，电容支路电流为

$$I_C = \frac{U}{X_C} = U \omega C = 380 \times 314 \times 374 \times 10^{-6} = 44.7 (\text{A})$$

总电流为

$$I = \sqrt{(I_L \cos \varphi_1)^2 + (I_L \sin \varphi_1 - I_C)^2}$$
$$= \sqrt{(87.7 \times 0.6)^2 + (87.7 \times 0.8 - 44.7)^2} = 58.5 (\text{A})$$

功率因数为

$$\varphi = \arctan \frac{I_L \sin \varphi_1 - I_C}{I_L \cos \varphi_1} = 25.8^\circ$$
$$\cos \varphi = \cos 25.8^\circ = 0.9$$



【想一想】

- (1) 在电力系统中提高功率因数的常用方法是什么？
- (2) 电路中功率因数的高低是由电源决定的，还是由负载决定的？

2.4 三相交流电路

2.4.1 三相对称电源的产生

1. 概述

电能的产生、输送和分配一般采用三相制的正弦交流电，也就是由三个电压、频率相同而相位依次相差 120° 的电源供电系统，这样三个电源系统称为对称三相电源。

负载有原相和三相之分，单相负载点和三相制供电系统的某一个电源接通，如照明电路，三相负载则必须接通三个电源，如三相电动机，这样构成了三相交流电路，我们把组成三相电路的每一个单相电路称为一相。

三相制供电与单相交流供电相比具有下列主要优点。

- (1) 三相发电机在技术和经济上都比单相发电机优越。
- (2) 在相同的输电条件下，采用三相制输电可以大大节约线材。
- (3) 三相交流电动机的性能比单相电动机好，具有结构简单、运行可靠、维护方便等优点。

2. 三相对称电源的产生

三相对称电源是由三相交流发电机产生的。图 3-29 是最简单的具有一对磁极的三相交流发电机的原理图。电枢上装有三个同样的绕组 $U_1 U_2$ 、 $V_1 V_2$ 、 $W_1 W_2$ ， U_1 、 V_1 、 W_1 表示各相绕组的起始端， U_2 、 V_2 、 W_2 表示它们的末端。三相绕组的始端（或末端）彼此互差 120° 。电枢表面处的磁感应强度与电枢表面垂直且按正弦规律分布（图 2-29 中 $U_1 U_2$ 称为 L_1 相， $V_1 V_2$ 称为 L_2 相， $W_1 W_2$ 称为 L_3 相）。

当电枢由原动机拖动沿逆时针方向以角速度 ω 等速旋转时，每相绕组分别产生正弦电动势，称为相电动势，其方向规定由末端指向始端。因为三个绕组的形状、尺寸和匝数都相同，并以一角速度在同一磁场中旋转，所以三个电动势的频率和幅值都相同，唯一不同的是

初相，即三相电动势互差 120° 。因此，发电机产生的是对称三相电动势。同样，若用电压表示，则发电机产生的是对称三相电压，相电压方向和相电动势方向相反。由始端指向末端。

若以 L_1 相绕组经过中性面（磁感应强度 $B=0$ 处）的时刻为计时起点，如图 2-29 所示，则三相对称电压的瞬时值解析成为

$$u_1 = U_m \sin \omega t$$

$$u_2 = U_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$u_3 = U_m \sin(\omega t - 240^\circ) = U_m \sin(\omega t + 120^\circ)$$

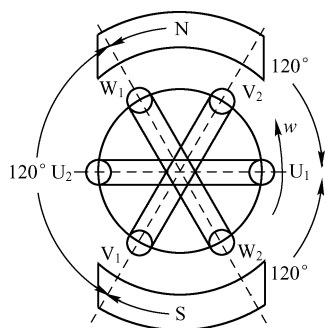


图 2-30 和图 2-31 分别表示三相电压的波形图和相量图，由图 2-30 可见，各相电压到达最大值的时间相差 $T/3$ （或相位差 120° ）。

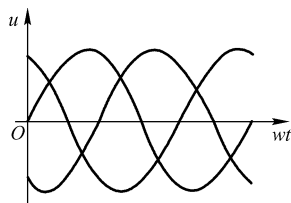


图 2-30 三相对称电压的波形图

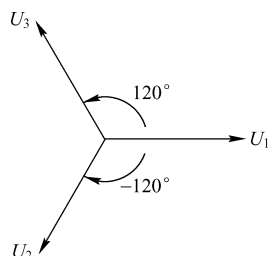


图 2-31 三相对称电压的相量图

三个相电压到达的最大值的次序为相序，按 $L_1 \rightarrow L_2 \rightarrow L_3 \rightarrow L_1$ 的次序循环下去称为顺序（正序），按 $L_1 \rightarrow L_3 \rightarrow L_2 \rightarrow L_1$ 的次序循环下去称为逆序（反序）。一般不加说明均认为采用顺序。

三相发电机的每一相绕组都自成一个独立的电源，可以单独和负载接成回路，但这样就失去三相制的优势。实际上可将三相绕组的三个末端引出线合并成一根，形成所谓三相四线制的接法。

2.4.2 三相电源的连接

三相电源的三相绕组有两个连接方式来供电：一种方式是星形（即 Y 形）连接，另一个方式是三角形（即 Δ 形）连接。对三相发电机来说通常采用星形连接，就是把三相绕组的末端 U_2 、 V_2 、 W_2 连接成一点 N，如图 2-32 所示，N 点称为三相电源的中性点或零点。

发电机三相绕组的三根始端 U_1 、 V_1 、 W_1 引出线，称为端线，俗称火线。中点 N 的引出线称为中线，为了安全，常将中线接地，俗称地线。这种有中线的三相供电线路称为三相四线制。如果不引出中线，则称为三相三线制。每相端线与中线之间的电压称为相电压，其有效值分别为 U_1 、 U_2 、 U_3 或一般用 U_p 表示。相电压的方向规定为三相绕组的始端指向末端。任意两根端线之间的电压称为线电压，其有效值分别用 U_{12} 、 U_{23} 、 U_{32} 或一般用 U_L 表示。它的方向由下标得出，如 U_{12} 是从 U_1 端指向 U_2 端。三相电源星形连接时，相电压与线电压的数值不同，相位也不同，利用相量图可以确定它们之间的关系。

根据基尔霍夫电压定律,可得到各线电压与相电压的相量关系如下:

$$U_{12} = U_1 - U_2$$

$$U_{23} = U_2 - U_3$$

$$U_{31} = U_3 - U_1$$

由图 2-33 所示的相量图可看到:相量 U_{12} 、 U_1 和 $-U_2$ 组成底角为 30° 的等腰三角形,所以线电压 U_{12} 与相电压 U_1 的有效值有如下关系:

$$U_{12} = 2U_1 \cos 30^\circ = \sqrt{3} U_1$$

同理有

$$U_{23} = \sqrt{3} U_2, U_{31} = \sqrt{3} U_3$$

一般形式为

$$U_L = \sqrt{3} U_p$$

而在相位上,线电压 U_{12} 超前相电压 U_1 为 30° 。

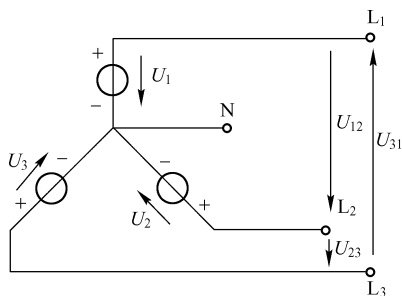


图 2-32 三相电源的Y形连接

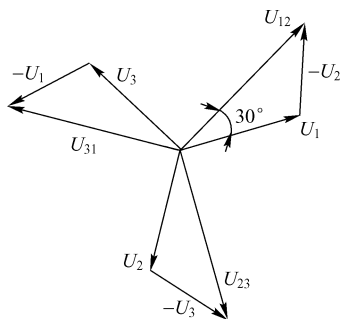


图 2-33 三相电源Y形连接的相量图

由此,我们可得到下列结论:三相电源星形连接时,如果相电压是对称的,则线电压的有效值 U_L 等于相电压有效值 U_p 的 $\sqrt{3}$ 倍,并且线电压在相位上超前相电压 30° ,因此三个线电压也是对称的。

三相四线制的低压供电系统中常用 380V/220V 供电,就是指电源Y形连接时的线电压为 380V,相电压为 220V 的供电系统。低压动力设备(如三相交流电动机)、大功率用电设备(如烘箱)等常采用线电压为 380V 的三相电源,而单相电气设备(如照明、家用电器)则多采用相压为 220V 的电源。供电系统若不特别声明,一般所说的电压都是指线电压。



【想一想】

- (1) 已知三相电源的线电压为 380V,试求相线与中线间的电压最大值是多少?
- (2) 现有三相四线制 380V/220V 供电系统,你知道如何从中取出 220V 单相电源吗?

2.4.3 三相负载的连接

三相负载的连接有两种形式,即星形连接和三角形连接。

1. 三相负载的星形连接

如图 2-34 所示, 3 个负载的一端连在一起, 接到电源中线 N 上, 3 个负载的另一端分别与三根端线 L_1 、 L_2 、 L_3 相连。在三相电路中, 流过各相负载的电流称为相电流。方向由端点 L_1 、 L_2 、 L_3 分别指向负载的中点 N' , 如图 2-34 所示, 记作 I_{1N} 、 I_{2N} 、 I_{3N} 。而端线中的电流则称为线电流, 记作 I_1 、 I_2 、 I_3 。显然, 在星形连接的负载中, 线电流等于相电流。中线电流为 I_N , 用相量表示, 则有 $I_N = I_1 + I_2 + I_3$ 。在三相四线制中, 计算一相负载相电流的方法与单相电路一样, 若不计输电线上的电压降, 则负载上的线电压和相电压也就是电源的线电压和相电压, 在电源对称的情况下, 负载的相电压在数值上等于线电压的 $1/\sqrt{3}$ 倍。

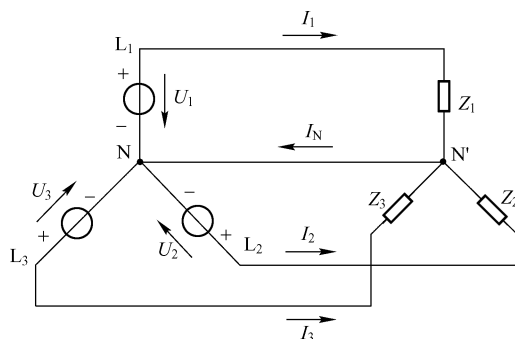


图 2-34 三相负载的星形连接

下面分别就三相负载对称和不对称的两种情况进行讨论。

1) 三相对称负载

若三相负载 $Z_1 = Z_2 = Z_3$, 则称为三相对称负载。

我们先分析计算 L_1 相电路, 如图 2-35 所示, 可得

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_1}$$

而相电流与相电压的相位差为

$$\varphi_1 = \arctan \frac{X}{R}$$

由对称关系得到

$$I_2 = I_3 = I_1$$

$$\varphi_2 = \varphi_3 = \varphi_1$$

三相对称负载 Y 形连接的相量图如图 2-36 所示, 从相量图可知, 3 个线电流 (或相电流) 也对称, 则

$$I_N = I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

即电线电流为零, 则电线不起作用, 可取消中线, 于是三相四线制就变成了三相三线制, 常用的三相交流电动机就可以不用中线。

2) 三相不对称负载

若 $Z_1 \neq Z_2 \neq Z_3$, 则称为三相不对称负载。在不对称的情况下, 由于中线的存在, 负载

相电压仍等于电源的相电压，即仍为对称的。但三相电流不再是对称的，因此中线电流为

$$I_N = I_1 + I_2 + I_3 \neq 0$$

中线中有电流。在负载不对称的情况下，如果中线断开，这时显然线电压保持对称，但由于缺少中线，则各相电压要重新分配，造成有的负载承受的电压超过额定电压，有的负载承受的电压低于额定电压，这两种情况都会造成严重事故，因此中线必不可少。为了防止中线断开，电工施工规则中规定在干线上的中线不允许装熔丝和开关。

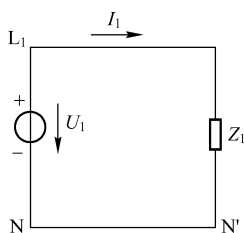


图 2-35 L_1 相电路

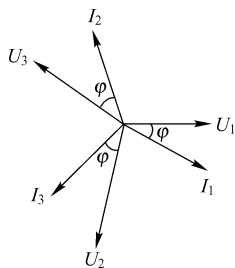


图 2-36 对称负载Y形连接相量图

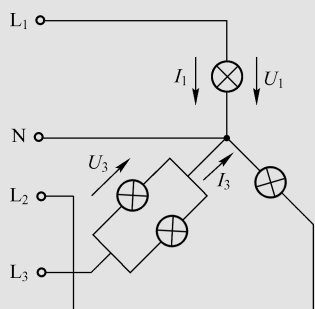


图 2-37

【例 2-10】 如图 2-37 所示，在 380V/220V 的三相四线制供电线路中，设 L_1 相是一个 220V、100W 的灯泡； L_2 相开路； L_3 相为两个 220V、100W 的灯泡，若中线突然断开，会发生什么情况？

解： L_1 相负载电阻为

$$R_1 = \frac{U^2}{P_N} = \frac{220^2}{100} = 484 (\Omega)$$

L_3 相负载电阻为

$$R_3 = \frac{R_1}{2} = 242 (\Omega)$$

有中线时， L_1 、 L_3 两相均承受 220V 电压，正常工作。

$$L_1 \text{ 相电流 } I_1 = \frac{U_1}{R_1} = \frac{220}{484} = 0.45 (\text{A})$$

$$L_3 \text{ 相电流 } I_3 = 2 \times I_2 = 0.9 (\text{A})$$

中线断开后，因为 L_2 相开路，所 L_1 和 L_2 两相负载串联，共同承担线电压 U_{31} 。根据串联分压原理得

$$U_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{31} = \frac{484}{484 + 242} \times 380 = 253 (\text{V})$$

$$U_3 = U_{31} - U_1 = 380 - 253 = 127 (\text{V})$$

因此， L_1 相灯泡将损坏。

2. 三相负载的三角形连接

三相负载也可接成三角形的形式，如图 2-38 所示，各相负载接在两根端线之间，所以

各相负载的相电压就是电源的线电压，因此其相电压是对称的，但负载的相电流不同于线电流。根据 KCL 定律可知：

$$I_1 = I_{12} - I_{31}$$

$$I_2 = I_{23} - I_{12}$$

$$I_3 = I_{31} - I_{23}$$

各相电流的计算方法与单相电路完全相同。

各相负载对称，则各相电流也对称，其相量图如图 2-39 所示。

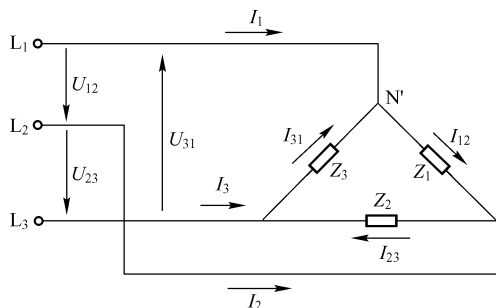


图 2-38 负载的三角形连接

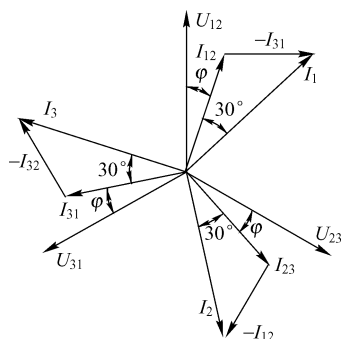


图 2-39 对称负载三角形连接时的相量图

从相量图可求得

$$I_1 = 2I_{12} \cos 30^\circ = \sqrt{3}I_{12}$$

同理有

$$I_2 = \sqrt{3}I_{23}; I_3 = \sqrt{3}I_{31}$$

即

$$I_L = \sqrt{3}I_p$$

由此可得结论：对称负载三角形连接时，线电流有效值 I_L 等于相电流有效值 I_p 的 $\sqrt{3}$ 倍。各线电流 I_1 、 I_2 、 I_3 分别比各相电流 I_{12} 、 I_{23} 、 I_{31} 滞后 30° 。因此 3 个线电流也是对称的。

负载采用哪种接法，应根据负载的额定电压和电源的线电压来决定。如果负载的额定电压等于电源的线电压，应采用三角形接法。如果负载的额定电压等于电源的相电压，应采用星形接法。



【想一想】

- (1) 三相三线制和三相四线制供电电路分别用在什么场合？
- (2) 星形连接时，中线是否可有可无？为什么？

2.4.4 三相电路的功率

一个三相负载吸取的总有功功率等于每相负载吸取的有功功率之和：

$$P_{\text{总}} = P_1 + P_2 + P_3 = U_{1\text{相}} I_{1\text{相}} \cos \varphi_1 + U_{2\text{相}} I_{2\text{相}} \cos \varphi_2 + U_{3\text{相}} I_{3\text{相}} \cos \varphi_3$$

在对称三相电路中，各相有功功率相同，即

$$P_{\text{总}} = 3U_{\text{相}} I_{\text{相}} \cos\varphi_{\text{相}}$$

对星形接法有

$$I_{\text{相}} = I_{\text{线}}, \quad U_{\text{相}} = \frac{U_{\text{线}}}{\sqrt{3}}$$

则

$$P_{\text{总}} = 3I_{\text{线}} \frac{U_{\text{线}}}{\sqrt{3}} \cos\varphi_{\text{相}} = \sqrt{3} U_{\text{线}} I_{\text{线}} \cos\varphi_{\text{相}}$$

对三角形接法有

$$U_{\text{相}} = U_{\text{线}}, \quad I_{\text{相}} = \frac{I_{\text{线}}}{\sqrt{3}}$$

则

$$P_{\text{总}} = 3U_{\text{线}} \frac{I_{\text{线}}}{\sqrt{3}} \cos\varphi_{\text{相}} = \sqrt{3} U_{\text{线}} I_{\text{线}} \cos\varphi_{\text{相}}$$

由此可见，对称负载时，不论何种接法，总功率的公式是一样的，即

$$P_{\text{总}} = \sqrt{3} U_{\text{线}} I_{\text{线}} \cos\varphi_{\text{相}}$$

同理，对称三相负载的总无功功率、总视在功率分别为

$$Q_{\text{总}} = \sqrt{3} U_{\text{线}} I_{\text{线}} \sin\varphi_{\text{相}}$$

$$S_{\text{总}} = \sqrt{3} U_{\text{线}} I_{\text{线}}$$

2.5 安全用电

2.5.1 电流对人体的伤害

电流对人体的伤害可分为两类：电击和电伤。

1. 电击

电击是电流对人体内部组织的伤害，是最危险的一种伤害，绝大多数（大约 85% 以上）的触电死亡事故都是由电击造成的。

电击的主要特征如下。

- (1) 伤害人体内部。
- (2) 在人体的外表没有显著的痕迹。
- (3) 致命电流较小。

按照发生电击时电气设备的状态，电击可分为直接接触电击和间接接触电击。

- (1) 直接接触电击：直接接触电击是触及设备和线路正常运行时的带电体发生的电击。
- (2) 间接接触电击：间接接触电击是触及正常状态下不带电，而当设备或线路故障时意外带电的导体发生的电击（如触击漏电设备的外壳发生的电击）。

2. 电伤

电伤是由电流的热效应、化学效应、机械效应等效应对人造成的伤害。触电事故中，纯电伤性质的及带有电伤性质的约占 75%。尽管大约 85% 以上的触电死亡事故是电击造成的，但其中大约有 70% 的含电伤成分。对专业电工自身的安全而言，预防电伤具有更加重要的意义。

(1) 电烧伤：是电流的热效应造成的伤害，分为电流灼伤和电弧烧伤。

(2) 皮肤金属化：是在电弧高温的作用下，金属熔化、汽化、金属微粒渗入皮肤，使皮肤粗糙而张紧的伤害。皮肤金属化多与电弧烧伤同时发生。

(3) 电烙印：是在人体与带电体接触的部位留下的永久性斑痕。斑痕处使皮肤失去原有弹性、色泽、表皮坏死、失去知觉。

(4) 机械性损伤：是电流作用于人体时，由于中枢神经反射和肌肉强烈收缩等作用导致的机体组织断裂、骨折伤害。

(5) 电光眼：是发生弧光放电时，由红外线、可见光、紫外线对眼睛的伤害。电光眼表现为角膜炎或结膜炎。

2.5.2 触电的种类和形式

按照人体触及带电体的方式和电流流过人体的途径，电击分为单相触电、两相触电和跨步电压触电。

1. 单相触电

当人体直接碰触带电设备其中的一相时，电流通过人体流入大地，这种触电现象称为单相触电。对于高压带电体，人体虽然未直接接触，但由于超过了安全距离，高电压对人体放电，造成单相接地而引起的触电，也属于单相触电。

2. 两相触电

人体同时接触带电设备或线路中的两相导体，或在高压系统中，人体同时接近不同相的两相带电导体，而发生电弧放电，电流从一相导体通过人体流入另一相导体，构成一个闭合回路，这种触电方式称为两相触电。

发生两相触电时，作用于人体上的电压等于线电压，这种触电是最危险的。

3. 跨步电压触电

当电气设备发生接地故障，接地电流通过接地体向大地流散，在地面上形成电位分布时，若人在接地短路点周围行走，其两脚之间的电位差，就是跨步电压。由跨步电压引起的人体触电，称为跨步电压触电。

2.5.3 安全用电措施

触电的原因，可能是人体直接接触带电导体，也可能是绝缘损坏，人触及带电的金属外壳而造成。大多数事故发生在后一种情况。为了防止这种危险，保护电气设备安全运行，其

安全用电措施可采用接地系统。

1. 保护接零

在正常情况下，将电气设备不带电的金属外壳或构架，与供电系统中的零线连接，如图 2-40 所示。

使用接零保护必须特别注意以下事项。

- (1) 保护接零主要用于中性点接地的 380V/220V 三相四线制电力系统中。
- (2) 用于保护接零或专用保护接地上不得装设熔断器或开关，以保证保护的可靠性。

2. 保护接地

将电动机等设备金属外壳（皮）和接地干线连接，而接地干线又与接地体连接，如图 2-41 所示。

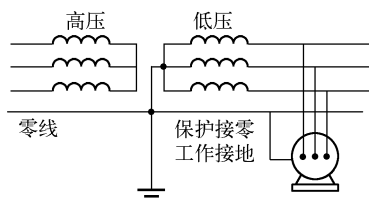


图 2-40 保护接零

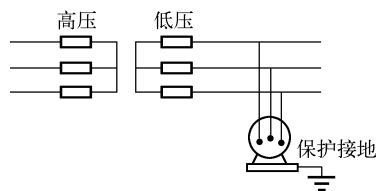


图 2-41 保护接地

保护接地一般适用于电压小于 1000V、电源中性点不接地的场合。

特别要注意的是：在同一供电线路中，不允许对一部分电器采用保护接地，而对另一部分电器采用保护接零的方法。避免当采用接地的设备一旦出现故障或外壳带电时，所有采用保护接零的设备外壳均带电的情况发生。

2.5.4 安全用电常识

- (1) 对电气设备均应制定安全操作规程，并严格遵守安全操作规程。
- (2) 对于出现故障的电气设备、装置和线路，不能继续使用，必须及时进行检修。
- (3) 电气设备一般都不能受潮，要有防止雨、雪和水侵袭的措施；电气设备在运行时要发热，要有良好的通风条件，有的还要有防火措施；有裸露带电体的设备，特别是高压设备，要有防止小动物窜入造成短路事故的措施。
- (4) 所有电气设备的金属外壳，都必须有可靠的保护接地。
- (5) 凡有可能被雷击的电气设备，要安装防雷装置。
- (6) 严禁用一线（相线）一地（指大地）安装用电器具。
- (7) 在一个插座上不可接过多或功率过大的用电器具。
- (8) 不掌握电气知识和技术的人员，不可安装和拆卸电气设备及线路。
- (9) 不可用金属丝绑扎电源线。
- (10) 不可用手来鉴定导体是否带电，不可用湿手接触带电的电器，如开关、灯座等，更不可用湿布揩擦电器。
- (11) 电动机和电器设备上不可放置衣物，不可在电动机上坐立，雨具不可挂在电动机

或开关等电器的上方。

(12) 堆放和搬运各种物资、安装其他设备时,要与带电设备和电源线相距一定的安全距离。

(13) 在搬运电钻、电焊机和电炉等可移动电器时,要先切断电源,不允许拖拉电源线来搬移电器。

(14) 在潮湿环境中使用可移动电器,必须采用额定电压为 36V 的低压电器,若采用额定电压为 220V 的电器,其电源必须采用隔离变压器;在金属(如锅炉、管道)内使用的移动电器,一定要用额定电压为 12V 的低压电器,并要加接临时开关,还要有专人在容器外监护;低电压移动电器应装特殊型号的插头,以防误插入电压较高的插座上。

(15) 雷雨时,不要走近高电压电杆、铁塔和避雷针的接地导线的周围,以防雷电入地时周围存在的跨步电压触电;切勿走近断落在地面上的高压电线,万一高电压电线断落在身边或已进入跨步电压区域时,要立即用单脚或双脚并拢迅速跳到 10m 以外的地区,千万不可奔跑,以防跨步电压触电。

(16) 发现有人触电,要立即采取正确的抢救措施。

① 使触电者迅速脱离电源。

② 当触电者脱离电源后,应在现场就地检查和抢救。

(17) 发生电气火灾时,首先应尽量切断电源再进行扑救。若不能切断电源,就只能带电灭火,扑灭电气火灾要使用不导电的灭火剂,以保证使用灭火设备的人员不致触电,同时使一些电气设备和仪器不致被灭火剂喷洒后无法修复。



【本章小结】

(1) 随时间按正弦规律变化的电压、电流称为正弦交流电,最大值、角频率和初相是正弦交流电的三要素。

(2) 正弦交流电可以用正弦函数和波形表示,但交流电的运算一般采用相量形式较简捷。相量图清楚地描述了正弦量的相位关系,它是分析和计算交流电路的重要工具。

(3) 在交流电路中,负载为电阻元件时 $I_R = U_R/R$,电压与电流同相;负载为电感元件时 $I_L = U_L/X_L$,其中 $X_L = \omega L$,电压超前电流 90° ;负载为电容元件时 $I_C = U_C/X_C$,其中 $X_C = 1/\omega C$,电压滞后电流 90° 。

(4) 在串联电路中,电压与电流的有效值同样满足欧姆定律 $I = U/Z$,其中 $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + X^2}$,阻抗角 $\varphi = \arctan X/R$ 表示电压与电流之间的相位差。当电抗 $X = X_L - X_C > 0$ 时, $\varphi > 0$,电压超前电流,电路呈感性;当 $X < 0$ 时, $\varphi < 0$,电压滞后电流,电路呈容性;当 $X = 0$ 时, $\varphi = 0$,电压与电流同相,电路谐振。

(5) 在交流电路中,有功功率 $P = UI\cos\varphi = I^2 R$,无功功率 $Q = UI\sin\varphi = I^2 X$,视在功率 $S = UI$, $\cos\varphi$ 称为功率因数。

(6) 感性负载可以通过并联一个适当的电容以提高功率因数。把功率因数从 $\cos\varphi_1$ 提高到 $\cos\varphi$ 所需电容值为 $C = (P/\omega U^2)(\tan\varphi_1 - \tan\varphi)$ 。

(7) 三相电路。

① 对称三相电源星形接法：线电压等于相电压的 $\sqrt{3}$ 倍。

② 对称三相负载星形接法（有中线），负载的相电流与线电流相等，相位相同，中线电流 $I_N = 0$ 。

③ 对称三相负载三角形接法，负载的相电压等于电路的线电压，负载的相电流为线电流的 $1/\sqrt{3}$ ，相电流超前线电流 30° 。

④ 对称三相负载总有功功率 $P = \sqrt{3} U_{\text{线}} I_{\text{线}} \cos \varphi_{\text{相}}$ 。

总无功功率 $Q = \sqrt{3} U_{\text{线}} I_{\text{线}} \sin \varphi_{\text{相}}$ 。

总视在功率 $S = \sqrt{3} U_{\text{线}} I_{\text{线}}$ 。

(8) 电流对人体的伤害可分为电击和电伤。

(9) 按照人体触及带电体的方式和电流流过人体的途径，电击分为单相触电、两相触电和跨步电压触电。

(10) 为了保障人身和电气设备安全运行，通常将电气进行工作接地和保护接地。

工作接地（保护接零）：是在正常情况下将电气设备不带电的金属外壳或构架，与供电系统中的零线连接。

(11) 安全用电常识。

① 不可用手来鉴定导体是否带电，不可用湿手接触带电的电器，如开关、灯座等，更不可用湿布揩擦电器。

② 电动机和电器设备上不可放置衣物，不可在电动机上坐立，雨具不可挂在电动机或开关等电器的上方。

③ 雷雨时，不要走近高电压电杆、铁塔和避雷针的接地导线的周围，以防雷电入地时周围存在的跨步电压触电。

④ 触电急救。使触电者迅速脱离电源并进行现场就地检查和抢救。

⑤ 电气火灾。首先应尽量切断电源，再用绝缘灭火器进行灭火。



【习题】

2.1 已知交流电动势 $e = 282 \sin(314t + 60^\circ)$ 。试求 E_m 、 E 、 ω 、 f 、 T 和 φ 各为多少？

2.2 已知某正弦电压的最大值 $U_m = 311 \text{ V}$ ，频率 $f = 50 \text{ Hz}$ ，初相位 $\varphi = 30^\circ$ ，试写出些电压的瞬时值表达式，给出波形图，并求出 $t = 0.01 \text{ s}$ 的电压值。

2.3 已知 $e_1 = E_{m1} \sin(\omega t + 90^\circ)$ ， $e_2 = E_{m2} \sin(\omega t - 45^\circ)$ ， $f = 50 \text{ Hz}$ ，求 e_1 与 e_2 的相位差，并指出它们超前、滞后的关系。当 $t = 0.05 \text{ s}$ 时， e_1 与 e_2 各处于什么相位？

2.4 已知正弦电压 $u_1 = 140 \sin(314t + 90^\circ)$ ， $u_2 = 112 \sin(314t - 90^\circ)$ ，画相量图，求 $u = u_1 + u_2$ 和 $u = u_1 - u_2$ 。

2.5 已知正弦电流 $i_1 = 3\sqrt{2} \sin(\omega t + 60^\circ)$ ， $i_2 = 4\sqrt{2} \sin(\omega t - 30^\circ)$ ，画相量图，求 $i_1 + i_2$ 和 $i_1 - i_2$ 。

2.6 有一个 220V、45W 的电烙铁接到 220V 工频电源上,试求电烙铁的电流和电阻,画出电压、电流的相量图。

2.7 一个 $L=0.5\text{H}$ 的线圈接在 220V、50Hz 的交流电源上,求线圈中的电流和无功功率。

2.8 在日光灯照明工频电路中,测得镇流器(它的电阻忽略不计)的电压为 190V,电流为 0.4A,求镇流器的电感 L ,无功功率 Q 和镇流器储存的磁场能量最大值 W_{lm} 。

2.9 把 $C=20\mu\text{F}$ 的电容接到 $u=141\sin\left(100\pi t+\frac{\pi}{6}\right)$ 的电源上,求:

(1) 流过电容的电流,并写出该电流的瞬时值表达式;

(2) 电压和电流的相量图;

(3) 无功功率。

2.10 在 RLC 串联电路中,已知 $R=10\Omega$, $L=0.1\text{H}$, $C=200\mu\text{F}$,电源电压 $U=100\text{V}$,频率 $f=50\text{Hz}$,求:

(1) 电路中的电流;

(2) 功率因数 $\cos\varphi$,视在功率 S ,平均功率 P ,无功功率 Q ;

(3) 画出电压、电流的相量图。

2.11 在 RLC 串联电路中,已知电源电压 $u=120\sqrt{2}\sin t$,当电流 $I=10\text{A}$ 时,电路的功率 $P=155\text{W}$,电容电压 $U_{\text{C}}=81\text{V}$,求电路的电阻 R 、电感 L 、电容 C 及功率因数 $\cos\varphi$ 。

2.12 在 RLC 串联电路中,已知电路的电流 $I=1\text{A}$,电阻电压 $U_{\text{R}}=15\text{V}$,电感电压 $U_{\text{L}}=80\text{V}$,电容电压 $U_{\text{C}}=100\text{V}$,求:

(1) 电路的总电压 U ;

(2) 电阻 R ,感抗 X_{L} 和容抗 X_{C} ;

(3) 电路的平均功率 P ,无功功率 Q 及视在功率 S 。

2.13 工作接地和保护接地有什么区别?它们各适用于什么场合?

2.14 为什么在同一供电线路中不能一部分电气设备采用工作接地,而另一部分设备采用保护接地的措施?

2.15 遇有人触电和火灾事故时应该如何处理?

第3章 半导体器件

【主要内容】

- ☺ 半导体基础知识。
- ☺ 二极管、三极管、晶闸管的工作原理、特性、参数、特点及用途。

【重点和难点】

- ☺ 二极管的单向导电性。
- ☺ 三极管的放大原理及输入、输出特性。
- ☺ 晶闸管可控单向导电性。

3.1 半导体二极管

半导体二极管又称为晶体二极管，简称二极管。它是用半导体材料制作而成的，其导电性能介于导体与绝缘体之间的物质，它们都是四价元素，如硅（Si）、锗（Ge）等。纯净的半导体又称为本征半导体，其原子都能按一定规律整齐排列，因此呈晶体结构。在本征半导体中掺入不同的微量元素，就会得到导电性质不同的半导体材料，即空穴型半导体（P型半导体）、电子型半导体（N型半导体）。

3.1.1 半导体二极管的结构、类型

1. 二极管的结构

将PN结封装，并引出相应的电极引线，就成为半导体二极管。其中从P区引出的电极称为二极管的正极，从N区引出的电极称为二极管的负极。二极管的外形、结构如图3-1（a）（b）所示。

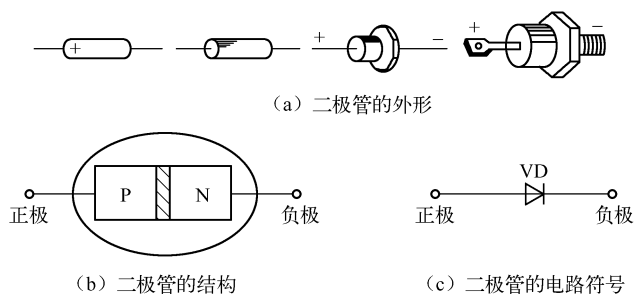


图3-1 二极管的外形、结构及电路符号

2. 二极管的符号

如图 3-1 (c) 所示为二极管的电路符号, 电路中通常用字母 VD (或 V) 表示二极管。

3.1.2 半导体二极管的伏安特性

二极管既然是一个 PN 结, 也就同样具有单向导电性。我们把流过二极管的电流与管子两端电压之间的对应关系称为二极管的伏安特性。它是一条曲线, 我们称其为二极管的伏安特性曲线, 如图 3-2 所示。

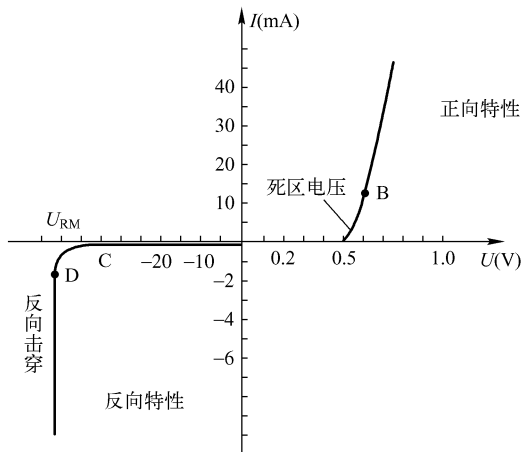


图 3-2 二极管的伏安特性曲线

1. 二极管正向特性

从二极管伏安特性曲线可以看出, 当二极管两端所加正向电压较小时, 二极管还不能导通, 这一段电压称为死区电压。通常硅管的死区电压约为 0.5V, 锗管的死区电压约为 0.1V。当外加正向电压低于死区电压时, 正向电流几乎为零。当外加正向电压超过死区电压后, 正向电流开始增大, 在 B 点之后, 只要电压略有增加, 电流急剧增大, 二极管处于正向导通状态。导通时二极管的正向压降变化不大, 硅管约为 0.7V, 锗管约为 0.3V。

2. 二极管反向特性

当二极管两端外加反向电压时, 二极管处于反向截止状态, 反向电流很少, 而且反向电压增大, 反向电流基本上保持不变, 称为反向饱和电流, 记作 I_s 。一般硅管约为几到几十微安, 锗管约为几十到几百微安。当外加反向电压过高且大于反向击穿电压 U_{RM} 后, 反向电流在 D 点之后会突然剧增, 二极管失去单向导电性, 这种现象称为击穿。

普通二极管被击穿后, 由于反向电流很大, 一般会造成“热击穿”, 不能恢复原来性能, 此时二极管也就失效了。

3.1.3 半导体二极管的主要参数及用途

1. 二极管的主要参数

(1) 最大整流电流 I_F : 是指二极管长期工作时, 允许通过的最大正向平均电流。超过

这一数值时二极管将因过热而烧坏。因此,电流较大的二极管必须按规定加装散热片。

(2) 最高反向工作电压 U_{RM} : 是指二极管反向击穿时的电压值。超过这一数值时,二极管将会被击穿。故在选用时应保证反向工作时所加反向电压不能超过 U_{RM} 。并尽量留有一定的余地,以免二极管烧毁。

(3) 反向电流 I_S : 是指二极管未被击穿时的反向电流。其值越小,说明二极管的单向导电性越好。

2. 二极管的主要用途

(1) 整流: 利用二极管的单向导电特性,可在电源电路中用于整流。

(2) 稳压: 利用二极管的反向击穿特性,可用于稳压。

稳压二极管是一种特殊的二极管,它主要工作在反向击穿区域,其特性和普通二极管类似。但它的反向击穿是可逆的,不会发生“热击穿”,而且其反向击穿后的特性曲线比较陡直,即反向电压基本不随反向电流变化而变化,这就是稳压二极管的稳压特性。

稳压二极管的主要参数如下。

① 稳定电压 U_Z : 又称为击穿电压,是稳压管正常工作时所加的反向电压。

② 稳定电流 I_Z : 是稳压管的正常工作时流过管子的电流。

③ 最小稳定电流 I_{ZK} : 是稳压管进入正常稳压状态时所必需的起始电流,小于此值,稳压管无法进入击穿状态,从而起不到稳压作用。

④ 最大电流 I_Z : 是允许流过稳压管的最大工作电流。

稳压二极管使用时一般要串联限流电阻,以确保工作电流不超过最大稳定电流 I_{ZM} 。稳压二极管伏安特性曲线和电路符号如图 3-3 所示。

(3) 发光: 一些特殊的半导体材料,如砷化镓等制成的二极管,当加上工作电压时,可发出不同颜色的光。利用这一特点,可制作各种不同的发光二极管。

发光二极管正常工作时,当工作电流为 $10 \sim 30\text{mA}$ 时,其正向工作电压降为 $1.5 \sim 3\text{V}$ 。

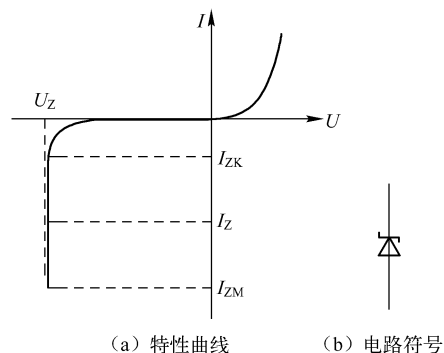


图 3-3 稳压二极管的伏安特性曲线和电路符号

二极管的用途还有检波、开关、变容等。



【想一想】

使用二极管时应该注意些什么问题? 稳压二极管正常使用时应处于何种偏置状态?



【知识拓展】二极管的识别方法

二极管的识别很简单,小功率二极管的 N 极(负极),在二极管外表大多采用一种色圈标出来,有些二极管也用二极管专用符号来表示 P 极(正极)或 N 极(负极),也有采用符号标志为“P”、“N”来确定二极管极性的。发光二极管的正、负极可从引脚长短来识别,长脚为正,短脚为负。

3.2 半导体三极管

3.2.1 三极管的结构和符号

1. 三极管的外形

三极管具有三个电极，这也就是“三极管”简称的来历。各类半导体三极管的外形如图 3-4 所示。

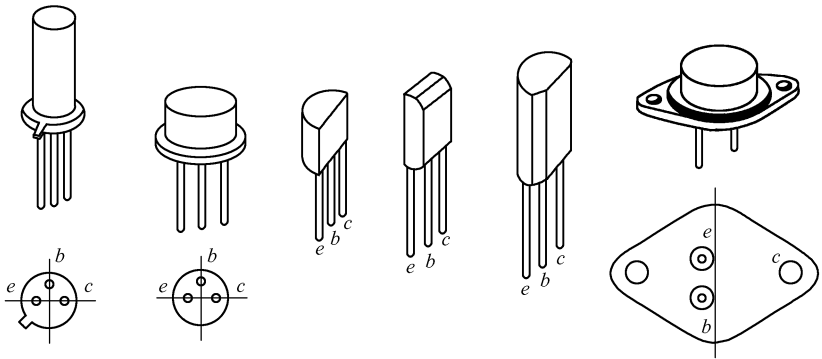


图 3-4 半导体三极管的外形

2. 三极管的结构

三极管内部是由 P 型半导体和 N 型半导体组成的三层结构，根据分层次序分为 NPN 型和 PNP 型两大类。如图 3-5 (a)、(b) 所示。如果两边是 N 型半导体，而中间夹着 P 型半导体，则称为 NPN 型三极管；如果两边都是 P 型半导体，中间夹着 N 型半导体，则称为 PNP 型三极管。

上述三层结构为三极管的三个导电区，分别引出三个电极。中间比较薄的一层为基区，引出的电极称为基极 b；另外两层分别为发射区和集电区，其中从发射区引出的电极称为发射极 e，从集电区引出的电极称为集电极 c，如图 3-5 (a)、(b) 所示。

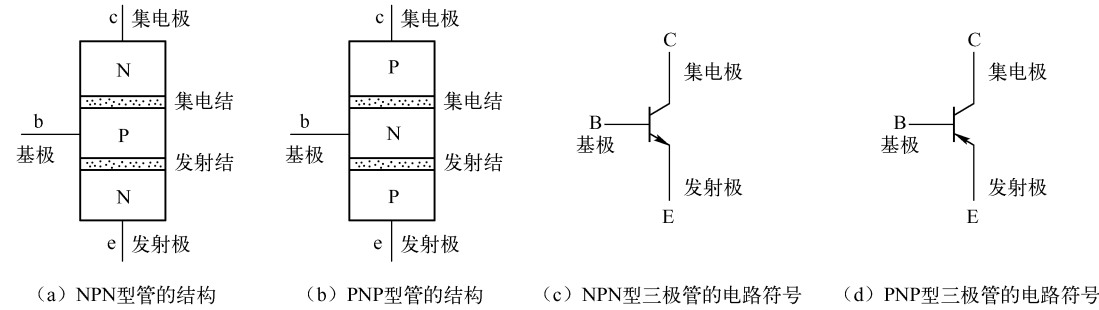


图 3-5 三极管的结构和电路符号

三层结构中还可以形成两个 PN 结，分别称为发射结和集电结。三极管符号中的箭头方向就是表示发射结的方向，也是表示发射结正向偏置时电流的方向，因此从它的方向即能判断三极管是 NPN 型还是 PNP 型。

3. 三极管的电路符号

三极管的电路符号如图 3-5 (c)、(d) 所示。三极管的这种内部结构特点，是三极管能够起放大作用的内部条件。

3.2.2 三极管的电流放大作用

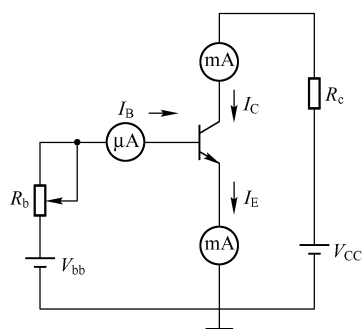


图 3-6 三极管电流放大原理图

为了实现三极管的电流放大作用，三极管除了结构上的特点之外，还必须具备一定的外部条件：三极管的发射结加正向偏置电压，集电结加反向偏置电压，如图 3-6 所示。

经过大量实验，我们可以得出如下结论。

(1) 三极管 3 个电极的电流满足如下关系： $I_E = I_C + I_B$ ，它们符合基尔霍夫电流定律。

(2) 3 个电流中，基极电流 I_B 很小，而 I_C 与 I_E 相差无几，可认为相似相等， $I_C \approx I_E$ 。

(3) 对于一个确定的三极管， I_C 与 I_B 的比值基本不变，该比值称为共发射极直流电流放大系数，记作 $\bar{\beta}$ ，即 $\bar{\beta} = I_C / I_B$ 。

(4) 基极电流的微小变化 (ΔI_B) 能引起集电极电流的很大变化 (ΔI_C)，此称为三极管的电流放大。 ΔI_C 与 ΔI_B 的比值称为共发射极交流电流放大系数，记作 β ，即 $\beta = \Delta I_C / \Delta I_B$ 。从测试数据中可以看出， $\beta \approx \bar{\beta}$ ，故在工程上 β 和 $\bar{\beta}$ 不必严格区分，估算时可以通用。

(5) $I_B = 0$ 时， I_C 有一个很微小的电流，近似为零，此电流称为三极管的穿透电流，记作 I_{CEO} ，锗管此值为 mA 级，硅管此值为 μA 级。

根据以上分析可以得知， I_E 是由 I_B 和 I_C 组成的，所谓电流放大并非是电流自行放大，而是集电极电流受基极电流的控制，基极一个小电流的变化，会引起集电极一个较大电流的变化，实现以弱控强。三极管放大电路中， I_C 随 I_B 的变化而变化的过程，称为三极管的电流放大。由此可见，三极管是一种具有电流放大作用的半导体器件。

3.2.3 三极管的伏安特性曲线

1. 三极管的输入特性

如图 3-6 所示的电路中，基极电流 I_B 所经过的回路称为输入回路，而把 U_{CE} 一定时 I_B 与 U_{BE} 之间的关系称为三极管的输入特性。

三极管的输入特性曲线如图 3-7 所示，由此可以看出，三极管的输入特性是非线性的，它和二极管的正向特性很相似，也有一段死区（硅管约为 0.5V，锗管约为 0.1V）。当三极管正常工作时，三极管处于导通区，发射结压降变化不大，此时发射结所加的电压 U_{BE} 称为

导通电压（硅管约为 $0.6 \sim 0.7\text{V}$ ，锗管约为 $0.2 \sim 0.3\text{V}$ ）。在导通区，基极电流 I_B 随发射结电压 U_{BE} 的变化而变化。由图 3-6 还可以看出，当 U_{CE} 增大时曲线向右移，即 U_{BE} 略有增加，但 U_{CE} 大于 1V 之后曲线基本重合。

2. 三极管的输出特性

在图 3-6 所示的电路中，集电极电流 I_C 所经过的回路称为输出回路，我们把当 I_B 一定时， I_C 与 U_{CE} 之间的关系称为三极管的输出特性。在不同的 I_B 下，可得出不同的曲线，所以三极管的输出特性是一组曲线。三极管的输出特性曲线如图 3-8 所示。

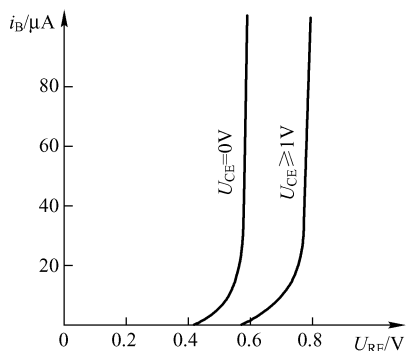


图 3-7 三极管的输入特性曲线

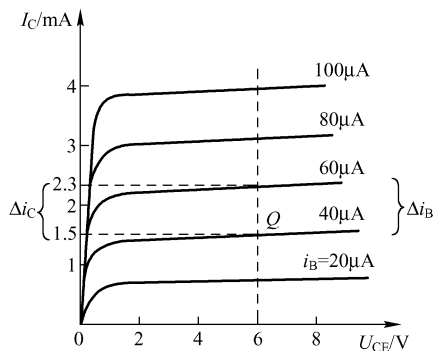


图 3-8 三极管的输出特性曲线

3. 三极管的工作状态

通常把输出特性曲线分成 3 个区域来进行分析。三极管的工作区域如图 3-9 所示。

(1) 放大区。输出特性曲线处于水平部分，也就是输出特性曲线的 $I_B > 0$ 和 $U_{CE} > 1\text{V}$ 的区域称为放大区。在放大区， I_B 不变时， I_C 也基本不变，当 I_B 发生改变， I_C 也随之变化。在图 3-8 中，当 I_B 由 $40\mu\text{A}$ 增大到 $60\mu\text{A}$ 时， I_C 也由 1.5mA 增大到 2.3mA 。表明 I_C 受 I_B 的控制，且 $I_C \approx \beta I_B$ 。可见在放大区，三极管具有电流放大作用。由于在不同 I_B 下，电流放大系数近似相等，所以放大区也称为线性区。三极管要工作在放大区的条件是：发射结必须处于正向偏置，集电结则应处于反向偏置。

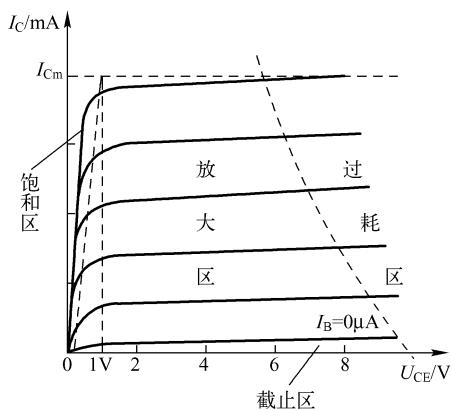


图 3-9 三极管的工作区域

(2) 截止区。 $I_B = 0$ 的曲线以下的区域称为截止区。此时三极管发射结处于反偏，由于发射结两端的电压小于死区电压，三极管的基极电流 $I_B = 0$ ，此时 $I_C = I_{CE0} \approx 0$ ，三极管处于截止状态，此时， U_{CE} 近似等于集电极电源电压 V_{CC} 。三极管就象开关的断开一样。实际上，对 NPN 硅管而言，当 $U_{BE} < 0.5\text{V}$ 时即已开始截止，但是为了使三极管可靠截止，常使 $U_{BE} \leq 0\text{V}$ ，此时发射结和集电结均处于反向偏置。

(3) 饱和区。输出特性曲线的陡直部分是饱和区，此时三极管发射结处于正偏，集电

结也处于正偏，三极管处于饱和状态。在饱和区， I_B 的变化对 I_C 的影响较小， $I_C \approx \beta I_B$ 的关系不再存在。三极管饱和时其管压降 U_{CE} 称为饱和压降 U_{CES} ， U_{CES} 很小，一般小功率的硅管约为0.3V，锗管约为0.1V，因此三极管相当于开关接通。饱和时集电极电流记为 I_{CS} ，称为饱和电流，其值主要由外电路决定。

综上所述，三极管在使用时通常有两类不同的方式，一种是三极管工作在放大状态，利用 I_B 对 I_C 的控制作用，这是模拟电子技术的应用。另一种是三极管工作在开关状态，即使三极管在饱和与截止两个状态之间转换，三极管相当于一个受控开关，这是数字电子技术的应用。

3.2.4 三极管的主要参数

1. 共发射极交流电流放大系数 β 和共发射极直流电流放大系数 $\bar{\beta}$

ΔI_C 与 ΔI_B 的比值称为共发射极交流电流放大系数，记作 β ； I_C 与 I_B 的比值称为共发射极直流电流放大系数，记作 $\bar{\beta}$ 。

2. 集电极—发射极穿透电流 I_{CEO}

当 $I_B = 0$ 时， I_C 有一个很微小的电流，此电流称为三极管的穿透电流，记作 I_{CEO} 。 I_{CEO} 不受 I_B 的控制，它跟随温度变化而变化，所以， I_{CEO} 的值越小，说明三极管性能越好。硅管的 I_{CEO} 远小于锗管，因此大多情况下都选用硅管。

3. 集电极最大允许电流 I_{CM}

正常工作时集电极所能允许通过的最大电流。若工作时 I_C 超过 I_{CM} ，三极管的 β 值将明显下降，性能变差，甚至有烧坏三极管的可能。

4. 集电极最大允许功率损耗 P_{CM}

P_{CM} 是三极管最大允许平均功率，是 I_C 和 U_{CE} 乘积允许的最大值，超过此值，三极管将过热而烧坏。因此大功率三极管在正常使用时要求加装散热片才能安全使用。使用三极管的工作点不可进入图3-9所示的过耗区。

5. 集电极—发射极反向击穿电压 $U_{(BR)CEO}$

三极管工作时， U_{CE} 应该小于此值，并应留有一定的余量，以免击穿。另处，温度升高将使 $U_{(BR)CEO}$ 降低，因而要留有余量。

3.3 晶闸管

3.3.1 普通晶闸管

晶闸管又名可控硅，它是一种大功率半导体器件。它具有容量大、效率高、控制方便、

寿命长等优点，是大功率电能变换与控制的理想器件。晶闸管种类很多，包括普通晶闸管、双向晶闸管、快速晶闸管等，本节介绍普通晶闸管。

1. 晶闸管的外形和结构

普通晶闸管（SCR）是由 PNPN 四层半导体材料构成的三端半导体器件，三个引出端分别为阳极 A、阴极 K 和门极 G。图 3-10 是晶闸管的外形，图 3-11 是其结构、电路符号。

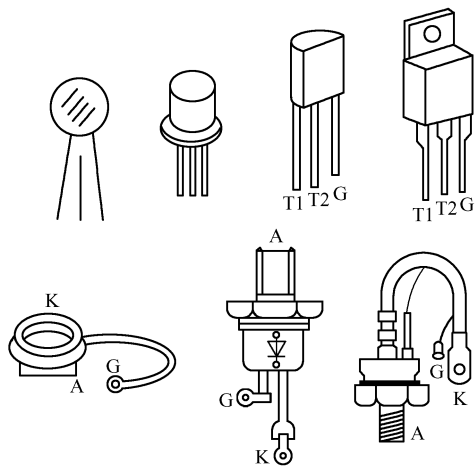


图 3-10 晶闸管的外形

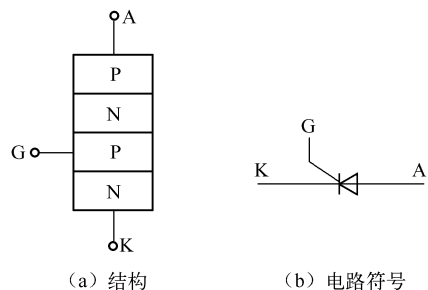


图 3-11 晶闸管的结构、电路符号

2. 晶闸管可控单向导电性

在如图 3-12（b）所示的电路中，把晶闸管的阳极 A 接电源负端，阴极 K 接电源正端，称为晶闸管的反向连接。此时，无论门极 G 所加电压是什么极性，晶闸管均处于阻断状态，灯泡不亮。

在如图 3-12（a）所示的电路中，把晶闸管的阳极 A 接电源正端，阴极 K 接电源负端，称为晶闸管的正向连接。若门极 G 所加触发电压为负时，则晶闸管也不导通，灯泡不亮。只有其门极 G 加上适当的正向触发电压时，晶闸管才能由阻断状态变为导通状态。此时，晶闸管阳极 A 与阴极 K 之间呈低阻导通状态，A、K 极之间电压降约为 1V。

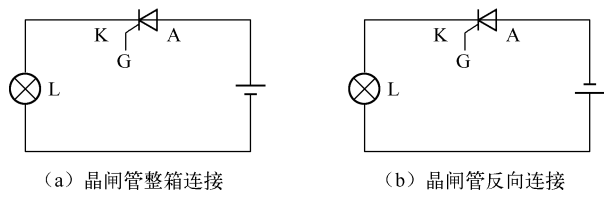


图 3-12 晶闸管单向导电性

普通晶闸管受触发导通后，其门极 G 即使失去触发电压，只要阳极 A 和阴极 K 之间仍保持正向电压，晶闸管将维持低阻导通状态。只有把阳极 A 电压撤除或阳极 A、阴极 K 之

间电压极性发生改变（如交流过零）时，普通晶闸管才由低阻导通状态转换为高阻阻断状态。普通晶闸管一旦阻断，即使其阳极 A 与阴极 K 之间又重新加上正向电压，仍要在门极 G 和阴极 K 之间重新加上正向触发电压后方可导通。

由此得出晶闸管导通和关断的条件如下。

（1）导通条件。在晶闸管的阳极加上正向电压，同时在门极加上适当的正向触发电压，两者必须同时具备，缺一不可。

（2）关断条件。要使已导通的晶闸管关断，只有改变阳极电压。在晶闸管的阳极加上反向电压；或暂时去掉阳极电压；或减少主回路电流 I ，使 I 降到一定值以下。

普通晶闸管的导通与阻断状态相当于开关的闭合和断开状态，用它可以制成无触点电子开关，去控制直流电源电路。

3. 晶闸管的主要参数

（1）额定正向平均电流 I_F 。在环境温度小于 40°C 和标准散热条件下，允许连续通过晶闸管阳极的工频（50Hz）正弦波半波电流平均值。

（2）维持电流 I_H 。在门极开路且规定的环境温度下，晶闸管维持导通的最小阳极电流。阳极电流 $I_A < I_H$ 时，晶闸管自动阻断。

（3）门极触发电压 U_G 和电流 I_G 。在规定的环境温度及一定的正向电压（ $u = 6\text{V}$ ）条件下，晶闸管从关断到完全导通所需的最小门极直流电压和电流。 $U_G = 1 \sim 5\text{V}$ ， I_G 为几十到几百毫安。

（4）正向阻断峰值电压 U_{DRM} 。门极开路，阳极和阴极加正向电压，晶闸管处于截止状态，此时允许加到晶闸管上的正向电压最大值称为正向阻断峰值电压，使用时正向电压超过此值，晶闸管即使不加触发电压也能从正向阻断转为导通。

（5）反向阻断峰值电压 U_{RRM} 。门极开路，阳极和阴极间加反向电压晶闸管截止，允许加到晶闸管上的反向电压最大值称为反向阻断电压。

3.3.2 双向晶闸管

双向晶闸管是由 N-P-N-P-N 五层半导体材料构成的，相当于两只普通晶闸管反相并联。对外，它也有 3 个电极，分别是主电极 T_1 、主电极 T_2 和门极 G。图 3-13 是其电路符号。

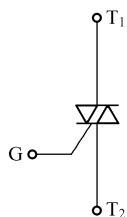


图 3-13 双向晶闸管的电路符号

双向晶闸管可以双向导通，即门极加上正或负的触发电压，均能触发双向晶闸管正、反两个方向导通，具体情况如下。

双向晶闸管的主电极 T_1 与主电极 T_2 间，无论所加电压极性是正向还是反向，只要门极 G 和主电极 T_1 （或 T_2 ）间加有正、负极性不同的触发电压，满足其必须的触发电流，晶闸管即可触发导通呈低阻状态。此时，主电极 T_1 、 T_2 间电压降约为 1V 。而且双向晶闸管一旦导通，即使失去触发电压，也能继续维持导通状态。只有当主电极 T_1 、 T_2 电流减小至维持电流以下或 T_1 、 T_2 间电压改变正、负极性且无触发电压时，双向晶闸管才被阻断。若要双向晶闸管再次导通，只有重新施加触发电压才能进行。



【知识拓展】用万用表测出双向晶闸管的三个电极

双向晶闸管除了一个电极 G 仍然叫控制极外，另外两个电极通常不再叫阳极和阴极，而统称为主电极 T_1 和 T_2 。双向晶闸管是一种 $N-P-N-P-N$ 型五层结构的半导体。

用万用表区分双向晶闸管电极的方法是：首先找出主电极 T_2 。将万用表置于 $R \times 100$ 挡，用黑表笔接双向晶闸管的任一个电极，红表笔分别接双向晶闸管的另外两个电极，如果表针不动，说明黑表笔接的就是主电极 T_2 。否则就要把黑表笔再调换到另一个电极上，按上述方法进行测量，直到找出主电极 T_2 。

T_2 确定后再按下述方法找出 T_1 和 G 极。由图 3-13 可见， T_1 与 G 是由两个 PN 结反向并联的，因设计需要和结构的原因， T_1 与 G 之间的电阻值，依然存在正反向的差别。用万用表 $R \times 10$ 或 $R \times 1$ 挡测 T_1 和 G 之间的正、反向电阻，如一次是 22Ω 左右，一次是 24Ω 左右，则在电阻较小的一次（正向电阻）黑表笔接的是主电极 T_1 ，红表笔接的是控制极 G 。



【本章小结】

(1) P 型半导体和 N 型半导体是杂质半导体，P 型半导体中的空穴数目多，N 型半导体中的电子数目多。

(2) PN 结是构成半导体器件的基础，它具有单向导电性，当 PN 结正偏时电阻较小，电流较大；当 PN 结反偏时电阻较大，电流较小。

(3) 半导体二极管的核心就是一个 PN 结，它的特性与 PN 结基本相同。伏安特性曲线和参数以不同的方式表示了二极管的特性。稳压二极管是利用了 PN 结的反向特性制成的，它工作在反向击穿区。

(4) 半导体三极管是由两个相互联系的 PN 结构成的，它是由基极电流控制集电极电流的一种电流控制器件。

(5) 三极管是放大电路的核心，放大电路必须保证三极管的发射结处于正向偏置，集电结处于反向偏置，三极管才具有电流放大作用，电路还可以将电流放大转换为电压放大。

(6) 晶闸管又名可控硅，它可以实现小信号控制大功率系统。晶闸管的导通与关断是通过改变阳极与阴极、门极与阳极的电压大小和方向来实现的。

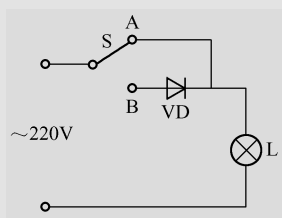


【习题三】

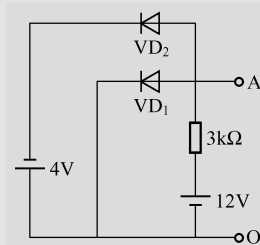
3.1 如图题 3-1 所示电路是白炽灯供电电路，试回答：

- (1) 当开关 S 接通 A 点时，白炽灯两端的电压是_____；
- (2) 当开关 S 接通 B 点时，白炽灯两端的电压是_____。

3.2 试判断图题 3-2 中二极管是导通还是截止？并求出 A、O 两端电压 U_{AO} 。设二极管为理想的。

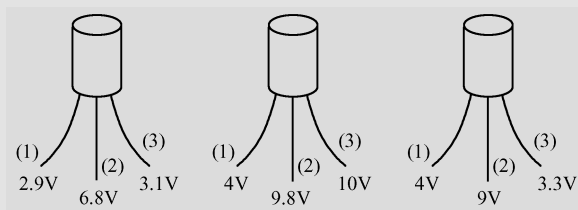


图题 3-1



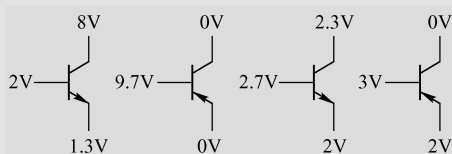
图题 3-2

3.3 在放大电路中测得各三极管电极电位如图题 3-3 所示，试判断各管的引脚、类型及材料。



图题 3-3

3.4 接在电路中的 4 个三极管用电压表测出它们各电极的电位如图题 3-4 所示，试判断各管分别工作在何种状态（放大、饱和、截止）。



图题 3-4

3.5 三极管的输出特性根据其工作状态的不同分为哪几个区域？每个区域的特点是什么？

3.6 测得工作在放大电路中的 NPN 型三极管的三个电极的电压分别是： $U_1 = 3.5V$ ， $U_2 = 2.8V$ ， $U_3 = 15V$ 。

- (1) 判断该三极管是硅管还是锗管；
- (2) 确定该三极管的 e、b、c。

3.7 两只硅稳压管的稳定电压分别为 $U_{z1} = 6V$ ， $U_{z2} = 3.2V$ ，若将它们串联起来，则可以得到几种稳定电压？各为多少？若将它们并联起来，情况会怎样？

第4章 放大电路及集成放大器

【主要内容】

- ☺ 基本共射放大电路的组成及工作原理。
- ☺ 多级放大电路、反馈放大电路及正弦波振荡电路。
- ☺ 功率放大器和集成运算放大器。

【重点和难点】

- ☺ 基本共射放大电路的工作原理。
- ☺ 反馈放大电路及正弦波振荡电路。

4.1 基本共射放大电路

4.1.1 电路组成

基本共射放大电路如图4-1所示。基本共射放大电路的组成如下。

三极管V是放大电路的核心元件，电路在工作时主要依靠三极管的电流放大作用来进行信号的放大。

电源 V_{CC} 是放大器的能源，为电路提供各种电压和电流。适当设置 R_b 、 R_c 的阻值，可使三极管的发射结正偏、集电结反偏，保证三极管工作在放大区。图4-1中三极管采用NPN型管，如三极管采用PNP型管，则须采用 $-V_{CC}$ 的直流电源。

R_b 是基极偏流电阻，改变 R_b 的阻值，即可改变基极偏流 i_B 的大小，从而改变了三极管的工作状态。若把 R_b 开路， $i_B=0$ ，三极管发射结处于截止状态，将导致放大器不能正常放大。

R_c 是集电极负载电阻，放大后的电流 i_c 流经 R_c 后将电流的变化转变为 R_c 上电压的变化，从而引起 u_{ce} 的变化，这个变化电压就是输出电压 u_o 。

C_1 和 C_2 是耦合电容，它们分别接在放大电路的输入端和输出端，利用电容器对交流电的阻抗很小的特点进行信号的传输，以实现耦合。同时利用电容器对直流电的阻抗很大的特点来隔断直流，从而避免信号源与放大电路之间、放大电路与负载之间直流电流的相互影响。因此，耦合电容的作用是“隔直通交”。

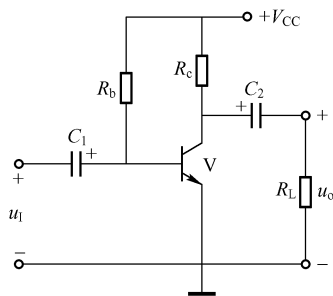


图4-1 基本共射放大电路

4.1.2 电路的工作原理

便于分析，电路中各符号做如下规定：直流量用大写字母、大写下标表示，如 I_B 、 U_{BE} ；交流量用小写字母、小写下标表示符号，如 i_b 、 u_{be} ；总变化量是交流量叠加在直流量上，用小写字母、大写下标表示，如 i_B 、 u_{BE} 。

1. 电路的静态

放大器未加输入信号即 $u_i = 0$ 时，电路的工作状态称为静态。这时电路中没有变化量，电路中的电压、电流都是直流量，如图 4-2 所示，此时直流量 I_B 、 I_C 、 U_{CE} 的值在晶体管输出特性曲线上所对应的点称为放大电路的静态工作点，简称 Q 点。此时，相应的直流量分别用 I_{BQ} 、 U_{BEQ} 、 I_{CQ} 、 U_{CEQ} 来表示。

由上可见，要分析计算放大电路的静态工作点所对应的 I_{BQ} 、 I_{CQ} 、 U_{CEQ} ，就应先画出放大电路的直流通路。直流通路是放大电路中直流通过的路径。由于电容器具有隔断直流的作用，因此画直流通路时电容相当于开路。图 4-3 是图 4-1 放大电路的直流通路。

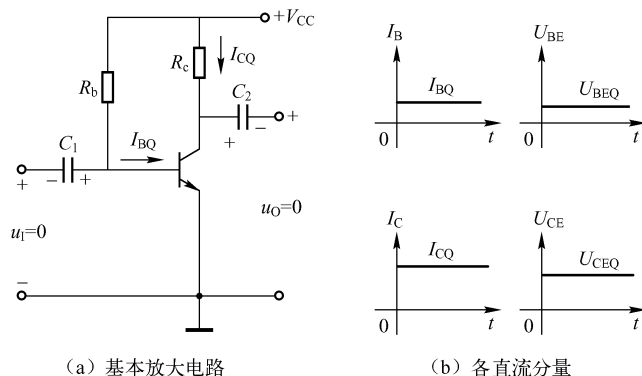


图 4-2 静态工作情况

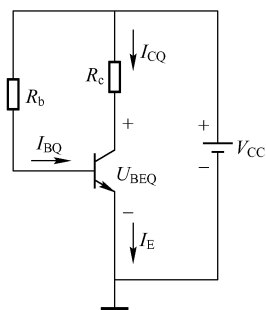


图 4-3 放大电路的直流通路

2. 电路的动态

放大器输入端加信号时，电路的工作状态称为动态。这时输入信号 u_i 叠加在直流的 U_{BE} 上，形成了既有直流量又有交流量的总变化量： $u_{BE} = U_{BE} + u_i$ 。基极电流也跟随发生变化，得到了一个基极电流总变化量： $i_B = I_B + i_b$ 。 i_b 是由 u_i 的变化引起的基极电流的交流变化量。经过三极管放大后，得到集电极电流交流变化量 i_c ，形成了集电极电流的总变化量： $i_C = I_C + i_c$ 。

动态工作情况如图 4-4 所示。

为了分析放大电路的动态工作情况，计算放大电路的放大倍数，应画出交流通路。交流通路是放大电路中交流电流通过的路径。由于对频率较高的交流信号，电容器相当于短路；同时一般直流电源的内阻很小，对交流信号来说，直流电源可视为短路。图 4-5 为图 4-4 放大电路的交流通路。

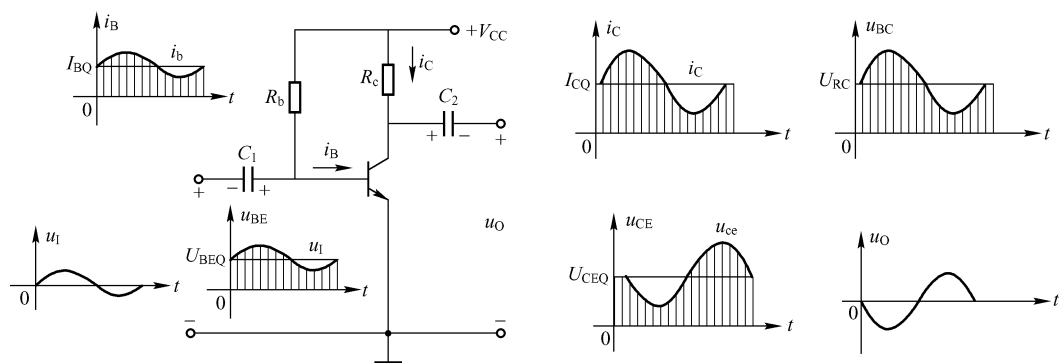


图 4-4 动态工作情况

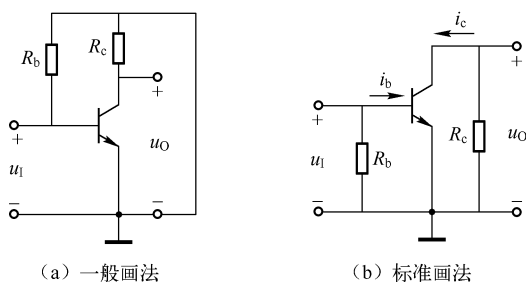


图 4-5 放大电路的交流通路

综上所述，放大电路中各点的电压、各支路的电流，都是直流量和交流量的叠加。直流量即静态工作点，是放大电路的基础；交流量是由输入信号产生的，是放大电路工作的目的。交流量是驮载在直流量上进行放大的。因此，静态工作点设置是否合理，将直接影响到放大电路能否正常工作。

3. 静态工作点的稳定

半导体三极管的温度稳定性较差，它的性能参数很容易受环境温度的影响，当温度变化时，由于三极管的 β 、 I_{CE0} 变化等原因，导致 I_C 发生变化，这样已经设置好的静态工作点在温度变化时将发生变化，导致信号出现失真。同样的道理，当更换三极管时也会导致信号出现失真。

在图 4-1 所示的基本共射放大电路中，它的基极偏置电阻一经选定， I_{BQ} 也随之确定为恒定值，因此这种电路也称为固定偏置电路。当温度升高时， β 增大、 I_{CE0} 增大，使得 I_{CQ} 增大、 U_{CE} 下降，从而使静态工作点发生改变，电路处于不稳定状态，甚至产生信号的失真。因此要使 u_o 波形稳定不失真，就要稳定放大电路的静态工作点；而稳定静态工作点，首先要稳定静态 I_{CQ} 的值。

如图 4-6 所示，因其基极电压主要由 R_{b1} 和 R_{b2} 分压产生，故称为分压式偏置稳定电路。这种电路在电子技术中

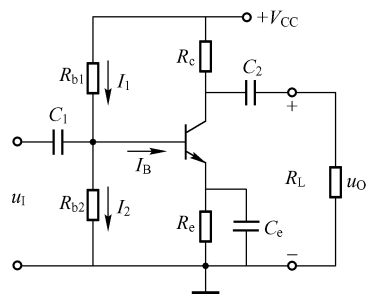
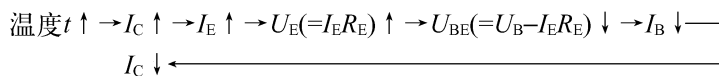


图 4-6 分压式偏置共射放大电路

(1) 利用电阻 R_{b1} 和 R_{b2} 分压来稳定基极电位。

(2) 利用发射极电阻 R_e 来获得反映电流 I_E 变化的信号, 反馈到输入端, 实现静态工作点的稳定。

其过程:



通常 $U_B \gg U_{BE}$ ，所以发射极电流为

$$I_E = \frac{U_B - U_{BE}}{R_e} \approx \frac{U_B}{R_e} = \frac{V_{cc} \times R_{b2}}{R_e (R_{b1} + R_{b2})}$$

从以上分析可以得到, U_B 和 I_C 是稳定的, 基本上不随温度而变, 而且也基本上与管子的参数 β 无关。

4.1.3 放大电路的非线性失真

当放大电路的静态工作点设置不当，输出信号将会出现失真。这种失真这是由于三极管的非线性所造成的，因而称为非线性失真。非线性失真有截止失真和饱和失真。

1. 截止失真

若静态工作点太低,即 I_{BQ} 、 I_{CQ} 太小,如图 4-7 所示,输入信号叠加在直流量上后,负半周仍有一部分处在发射结的死区或仍使发射结处于反偏,此时三极管处于截止状态,这样 i_B 、 i_C 、 u_{CE} 的负半周被削去,反相后 u_{CE} 和 u_o 的正半周被削去,这种失真由于三极管的发射结截止所造成的,故称为截止失真。

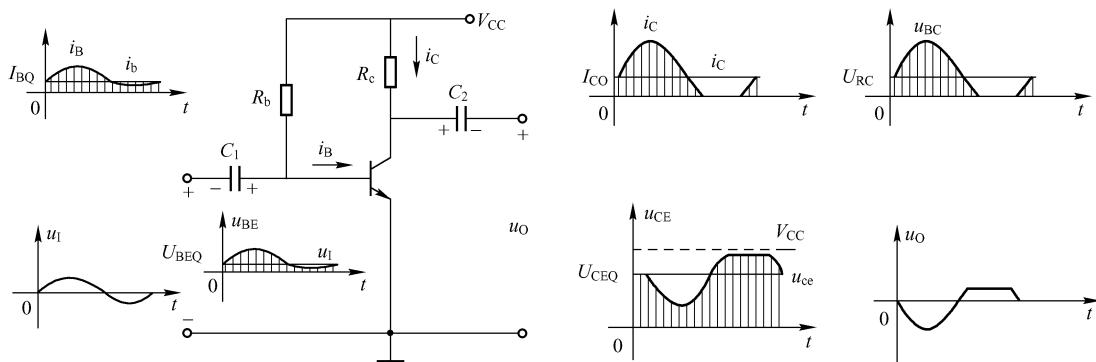


图 4-7 放大电路的截止失真

要消除截止失真, 应该减小 R_b , 使 I_{BQ} 增大, 提升 Q 值, 以此抬高直流分量, 让 i_b 的负半周脱离三极管的截止区, 使三极管工作在放大区。

2. 饱和失真

若静态工作点太高, 即 I_{BQ} 、 I_{CQ} 太大, 使三极管进入了饱和状态。如图 4-8 所示, 放大后的 i_c 已经超出了三极管饱和时集电极电流。

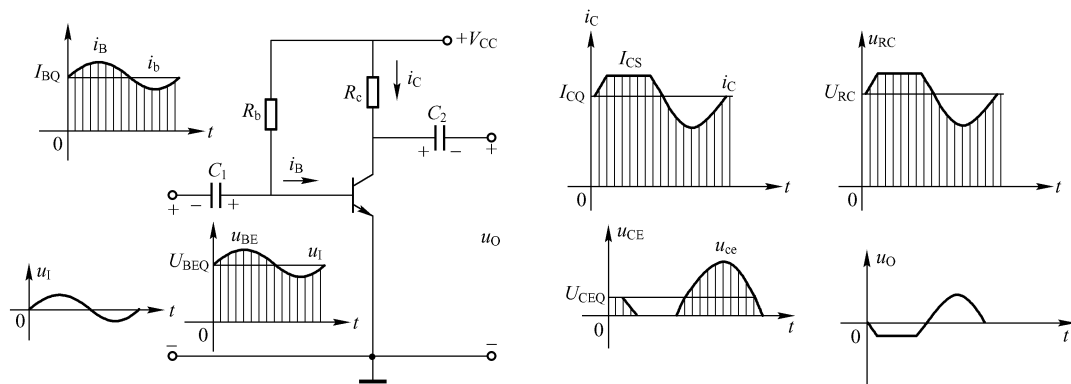


图 4-8 放大电路的饱和失真

由于 $I_C = (V_{CC} - U_{CE})/R_c$, 当三极管饱和时, 若忽略三极管的饱和压降 U_{CES} , 可以看出: $I_{CS} = V_{CC}/R_c$ 。因此, i_c 正半周的顶部被削去, 与此相应 u_{RC} 的正半周也被削去, 反相后 u_{CE} 和 u_o 的负半周被削去, 这种失真这是由于三极管饱和所造成的, 故称为饱和失真。

要消除饱和失真, 应增大 R_b , 使 I_{BQ} 减小, 降低 Q 值, 以此降低直流分量, 让 i_c 的正半周脱离三极管的饱和区, 使三极管工作在放大区。



【知识拓展】三极管放大电路的实际应用

三极管放大电路有比较广的应用, 若要把微弱的电信号放大, 就可使用光电检测与控制电路, 如图 4-9 所示, 电路参数为: $R_{b1} = 1k\Omega$, $R_{b2} = 4.3k\Omega$, $R_c = 5.1k\Omega$, $R_{RP} = 200\Omega$, $V_{CC} = 10V$ 。其中 V_1 是光电三极管, 当没有光照时 V_1 截止, 电阻大, V_2 截止, 无电流流过电流表; 当有光照时 V_1 导通, 电阻小, V_2 导通, 有电流流过电流表。这样就把光的强弱转换成电流的大小。光电检测与控制电路可作为探测器, 用于保护银行和不允许其他人进入重要场所等。

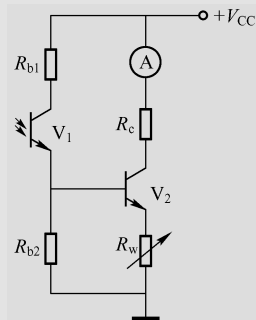


图 4-9 光电检测与控制电路

4.2 多级放大电路和反馈放大电路

4.2.1 多级放大电路

放大器的输入信号往往都很微弱, 一般为毫伏级或微伏级。为了推动负载工作要用多级

放大电路对微弱信号进行连续放大。多级放大电路的组成如图 4-10 所示。

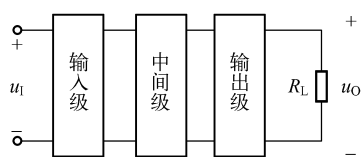


图 4-10 多级放大电路的组成

输入级直接连接信号源，一般要求它的输入电阻高一些。输入级和中间级的任务是电压放大。中间级根据需要可以是多级的电压放大电路，将微弱的输入电压放大到足够的幅度。输出级用于功率放大，向负载输出所需的功率。

多级放大电路中每两个单级放大电路之间的连接称为耦合。常用的耦合方式有：阻容耦合、直接耦合和变压器耦合，但变压器耦合应用很少。

1. 阻容耦合

级与级之间通过耦合电容与下级输入电阻连接，把信号传输到下一级的耦合方式称为阻容耦合，如图 4-11 (a) 所示。电容在这里起到隔直作用，可把前、后级的直流量隔开，从而使各级的静态工作点相互间没有影响。所以各级放大电路的静态工作点可以单独计算。耦合电容对交流信号的容抗必须很小，以便把前级输出信号几乎没有损失地传送到下一级。故耦合电容的容量一般相对较大，大多采用电解电容。

2. 直接耦合

不经过电抗元件，把前后级直接连接起来的耦合方式称为直接耦合，如图 4-11 (b) 所示。由于是直接连接，各级的直流通路相互沟通，因此各级静态工作点相互关联，相互牵制，使调整发生困难。但直接耦合放大电路不仅能放大交流信号，也能放大直流与缓慢变化的信号而获得广泛应用。在集成电路中，因无法制作大容量的耦合电容，往往采用直接耦合。

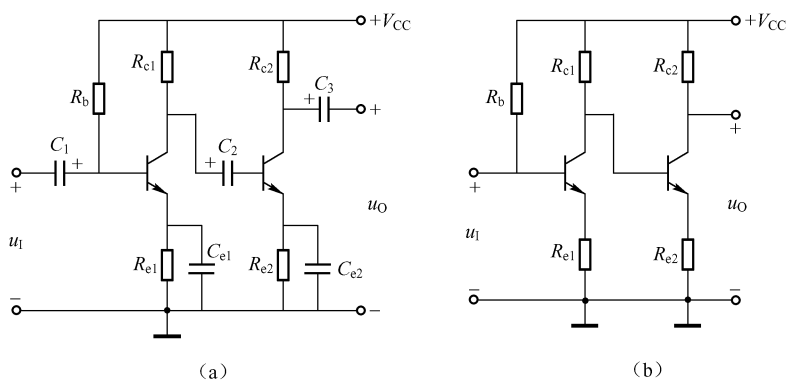


图 4-11 多级放大电路的耦合方式

3. 多级放大器输入和输出电阻

多级放大器的输入电阻为第一级的输入电阻，即 $R_i = R_{i1}$ 。多级放大器的输出电阻为最后一级的输出电阻，即 $R_o = R_{on}$ 。

4. 多级放大器的放大倍数

多级放大器把第一级输出的信号电压作为第二级输入电压进行再次放大，这样依次逐级放大后，总的电压放大倍数将为各级放大倍数的乘积，即

$$A_u = A_{u1} \cdot A_{u2} \cdot A_{u3} \cdots A_{un}$$

4.2.2 放大电路中的负反馈

1. 反馈的基本概念

反馈支路在基本放大电路中，信号从输入端进入放大器，经放大后从输出端输出，信号为单方向的正向传送。如果将输出量（电压或电流）的一部分或全部，反方向送回输入端，这种反向传输信号的过程，称为反馈。

因此要判断一个放大电路是否有反馈，只要看放大电路中是否存在把输出端和输入端联系起来的支路，这条支路就是反馈支路。

如图4-12（a）所示是一个两级放大电路，第一级的输出信号作为第二级的输入信号，信号只有从输入到输出的正向传送，输出端与输入端之间没有直接的联系，所以不存在反馈，这种情况称为开环。

如图4-12（b）所示，在输出 u_o 的正端和 K 点之间增加了连接电阻 R_f ，该电路除了从输入到输出的信号正向传送外，还有从输出到输入信号的反向传送，即从输出端到输入端有一条反馈支路 R_f ，所以存在反馈，这种情况称为闭环。

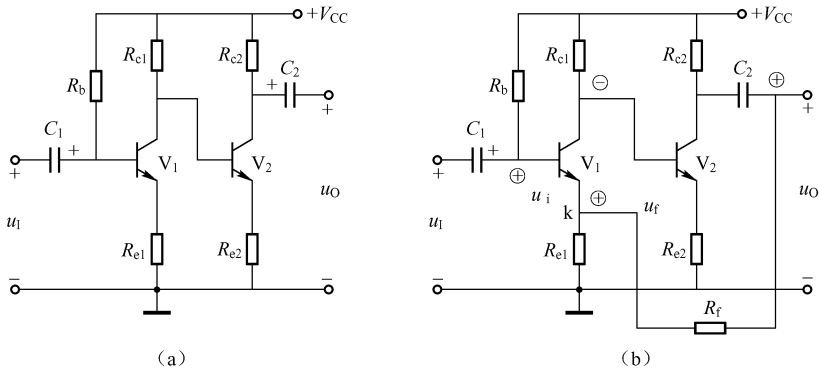


图 4-12 放大电路是否存在反馈

2. 反馈放大器的组成

由以上分析可知，反馈放大器是由两部分组成的，如图4-13所示。A 是基本放大电路，F 是反馈电路，构成一个闭环系统。这里 X 可以表示电压，也可以表示电流。其中， X_i 是输入信号， X_o 是输出信号， X_F 是反馈信号， X'_i 是输入信号与输出信号叠加以后的净输入信号。如果反馈量起到加强输入信号的作用，使净输入信号增加，即 $X'_i = X_i + X_F$ ，这种反馈称为正反馈；如果反馈量起到削弱输入信号

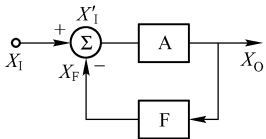


图 4-13 反馈电路框图

的作用，使净输入信号减小，即 $X'_i = X_i - X_F$ ，这种反馈称为负反馈。

3. 反馈放大器的类型

(1) 反馈极性。反馈使放大器的净输入量得到增强的是正反馈；反之，使放大器的净输入量减弱的则是负反馈。通常采用“瞬时极性法”来判断反馈的极性。

(2) 交流反馈和直流反馈。在放大电路处理的信号中存在直流分量和交流分量，如果反馈回来的信号是交流量，则是交流反馈；若反馈回来的信号是直流量，则是直流反馈。

(3) 电压反馈和电流反馈。反馈信号是从输出端取样的。如果反馈支路的取样对象是输出电压，则称为电压反馈；如果反馈支路的取样对象是输出电流，则称为电流反馈。

(4) 串联反馈和并联反馈。根据反馈在输入端的连接方法，可分为串联反馈和并联反馈。如果反馈信号和输入信号是串联的，该反馈是串联反馈；如果反馈信号和输入信号是并联的，则该反馈是并联反馈。

4. 负反馈放大器的特性

1) 提高了放大倍数的稳定性

负反馈放大器的放大倍数稳定性的提高，是以减小放大倍数为代价的。如图 4-13 所示的负反馈放大器框图中，在输入量 X_i 一定的情况下，若输出量 X_o 有所增加时，反馈量 X_F 也相应增大，削弱了输入量，使放大器的净输入量 X'_i 减小，则输出量 X_o 将减小。反之，若输出量 X_o 有所减小时，反馈量 X_F 也相应减小，使放大器的净输入量 X'_i 增大，则输出量 X_o 将增大。这样，电路趋于稳定，但电路的放大倍数下降了，负反馈越深，放大倍数降低越多，然而放大器工作却更加稳定。

2) 减小放大器的非线性失真

由于三极管是非线性器件，因此放大器的静态工作点如果选得不合适，输出信号波形将产生饱和失真或截止失真，即非线性失真。这种失真可以利用负反馈来得到改善，其原理是利用负反馈造成一个预失真的波形来进行矫正。如图 4-14 (a) 所示，电路无负反馈，当输入为正常的信号波形，由于电路元件的非线性，可能使输出波形正半周幅度大，负半周幅度小，从而出现了失真。在图 4-14 (b) 中，电路引入了负反馈，如果由于某种原因，使输出信号正半周幅度大，负半周幅度小，其反馈信号波形也是正半周幅度大，负半周幅度小。负反馈支路将它送到输入回路，由于净输入信号 $u'_i = u_i - u_F$ ，则正半周削弱得多一些，负半周削弱得少一些，使得净输入信号正半周小，负半周大，和无反馈时的输出波形正好相反，从而使输出波形失真获得补偿。

同样道理，负反馈可以减小由于放大器本身所产生的干扰和噪声。

3) 展宽放大器的通频带

放大器要放大的信号往往不是单一频率的信号，而是一段频率范围的信号。例如，广播中的音乐信号，其频率范围通常在几十赫兹到二十千赫兹之间。但由于放大电路中一般都有电抗元件（如电容、电感），它们在各种频率下的电抗值是不相同的，因而使得放大器对不同频率的信号的放大效果是不相同的。

我们把放大器对不同频率的正弦信号的放大效果称为放大器的频率响应，其中放大倍数的大小和频率之间的关系称为幅频特性。在阻容耦合放大电路中，由于耦合电容对信号的容

抗随频率降低而增大，因此信号在低频段的放大倍数减小，信号衰减了。而在高频段，由于三极管的结电容和电路存在的分布电容在高频区容抗较小，对信号的分流作用增大，使放大倍数减小，信号也衰减了。

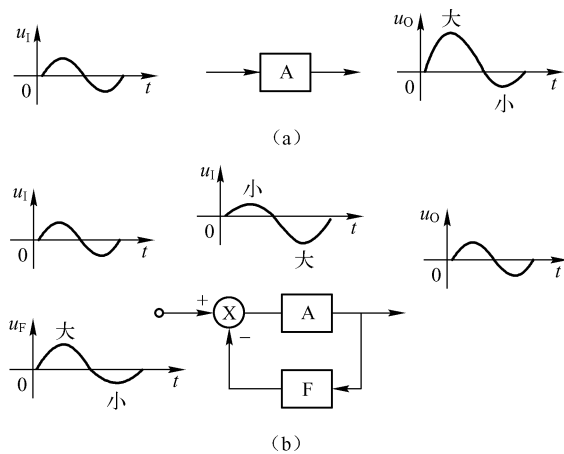


图 4-14 减小放大器的非线性失真

阻容耦合放大器的幅频特性如图 4-15 所示。我们规定当放大倍数下降为 $0.303A_{um}$ 时所对应的两个频率，分别称为下限频率 f_L 和上限频率 f_H ，在这两个频率之间的频率范围称为放大器的通频带，用 BW 表示，即 $BW = f_H - f_L$ ，通频带越宽，表示放大器工作的频率范围越宽。

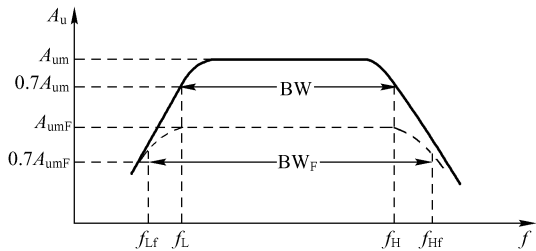


图 4-15 阻容耦合放大器的幅频特性

利用负反馈展宽放大器通频带的原理是：中频段电压放大倍数 A_{um} 较大，则输出电压 u_o 也较大，那么反馈电压 u_F 也较大，这样净输入电压 u_i' 大大减小，从而使反馈后的放大倍数 A_{umF} 大大减小。而低频段和高频段电压放大倍数 A_u 较小，输出电压 u_o 较小，反馈电压 u_{oF} 也较小，这样使净输入电压 u_i' 减小不多，从而使反馈后的 A_{uF} 减小较小。反馈后的幅频特性如图 4-15 虚线所示，由图 4-15 可见，加了负反馈后虽然各种频率的信号放大倍数都有下降，但通频带却加宽了。

4) 改变输入电阻和输出电阻

(1) 改变输入电阻。凡是串联负反馈，因反馈信号与输入信号串联，故使输入电阻增大；凡是并联负反馈，因反馈信号与输入信号并联，故使输入电阻减小。

(2) 改变输出电阻。凡是电压负反馈，因具有稳定输出电压的作用，使其接近于恒压

源,故使输出电阻减小;凡是电流负反馈,因具有稳定输出电流的作用,使其接近于恒流源,故使输出电阻增大。

综上所述,负反馈使放大器的放大倍数减小,但使放大器其他性能得到改善。而正反馈使放大器的放大倍数增大,利用这一特性可组成振荡电路。

4.2.3 正弦波振荡电路

不需要外加输入信号,能够自行产生特定频率的交流输出信号,从而将电源的直流电能转换成交流电能输出,这种电路就称为自激振荡电路。自激振荡电路中的正弦波振荡电路在自动控制、仪器仪表、广播通信等领域有广泛的应用,实验室中所用的低频信号发生器,就是一种正弦波振荡器的实例。

1. 自激振荡

如果在基本放大器中引入正反馈,如图4-16所示,则 u_o 越来越大。既然如此,我们干脆把输入信号 u_i 去掉,用反馈信号 u_F 代替输入信号,即在没有输入信号的情况下也能保持一定的输出信号幅度,这就是自激振荡器。

因此,产生自激振荡必须同时满足以下两个基本条件。

- (1) 相位平衡条件。 u_F 与 u_i' 必须同相位,也就是要求正反馈。
- (2) 幅值平衡条件。即 u_F 与 u_i' 值相等。

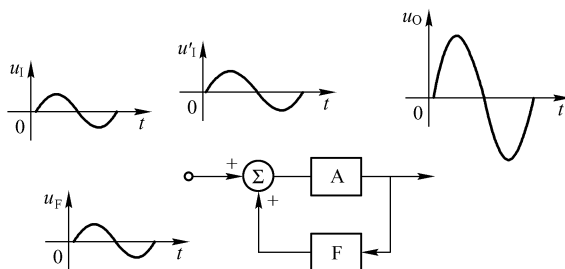


图4-16 振荡器框图

自激振荡两个条件中,关键是相位平衡条件,如果电路不满足正反馈要求,则肯定不会振荡。至于幅值条件,可以在满足相位条件后,调节电路参数来达到。因此,自激振荡实际上是一个不要输入信号且具有足够强的正反馈的放大器。

从振荡条件分析中,可以看到,振荡电路是由放大电路和反馈网络两大主要部分组成的一个闭环系统。另外,为了得到单一频率的正弦波,电路还必须具有选频特性,即只使某一特定频率的正弦波才能满足自激振荡条件,所以电路中还应包含选频网络。

根据选频网络的不同,正弦波振荡器可分为LC振荡器、RC振荡器及石英晶体振荡器。

2. LC 振荡电路

LC振荡器有变压器反馈式和三点式LC振荡器,其中三点式LC振荡器根据其中反馈网络的不同,又分为电感三点式振荡器和电容三点式振荡器两种。如图4-17所示是各种LC振荡器。

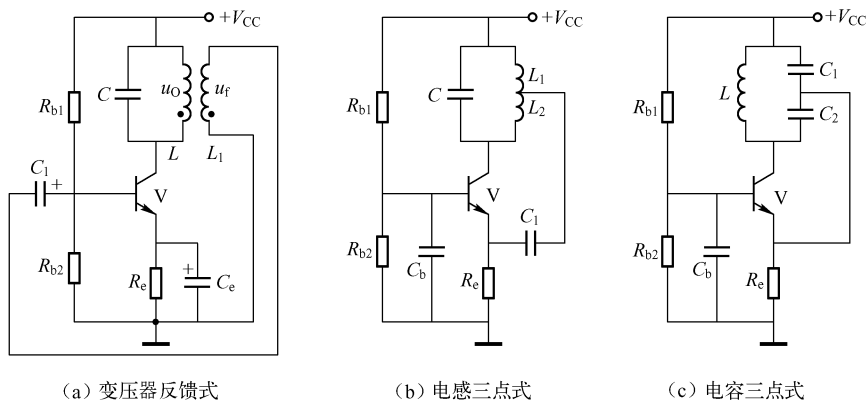


图 4-17 各种 LC 振荡器

3. RC 振荡器

如图 4-18 所示的电路即为 RC 振荡器。它由两部分组成，虚线框内是一个两级电压串联负反馈放大电路，它有足够大的稳定的放大倍数，以满足自激振荡的幅值条件。由于放大电路是由两级共射放大电路组成，因此输出电压 u_o 和输入电压 u_i 相位相同，以满足电路正反馈的需要。虚线框左边 R_1 、 C_1 和 R_2 、 C_2 构成串并联网络，并有 $R_1 = R_2$ 、 $C_1 = C_2$ 。网络的谐振频率为 f_0 。这个网络具有选频特性。

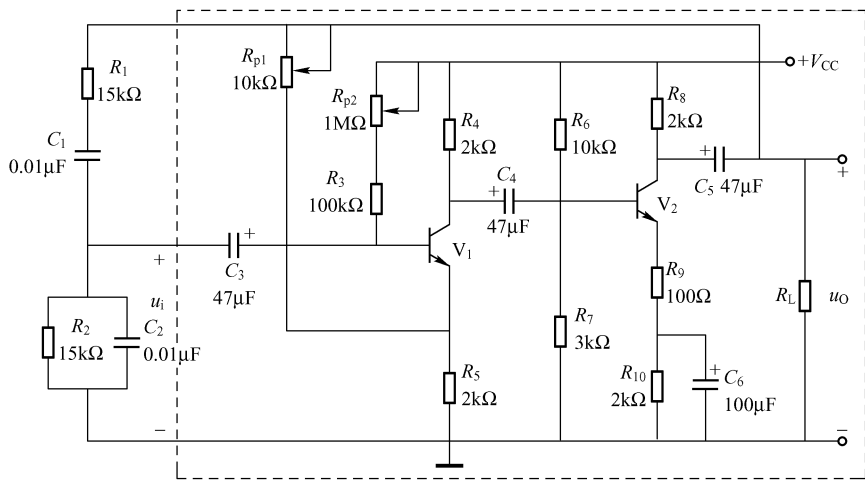


图 4-18 RC 振荡器

4. 石英晶体振荡器

石英晶体振荡器是利用石英晶体（二氧化硅的结晶体）的压电效应制成的一种谐振器件，它的基本构成大致是：从一块石英晶体上按一定方位角切下薄片（简称为晶片，它可以是正方形、矩形或圆形等），在它的两个对应面上涂敷银层作为电极，在每个电极上各焊一根引线接到引脚上，再加上封装外壳就构成了石英晶体谐振器，简称为石英晶体或晶体、晶振。其产品一般用金属外壳封装，也有用玻璃壳、陶瓷或塑料封装的。石英晶体谐振器是石英晶体振荡器的核心元件，其外形、结构和电路符号如图 4-19 所示。

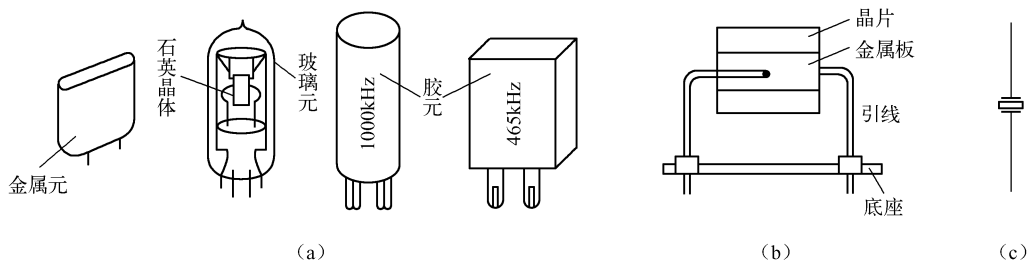


图 4-19 石英晶体谐振器的外形、结构和电路符号

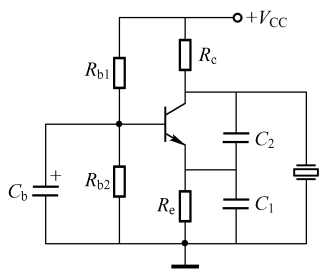


图 4-20 石英晶体振荡器

在石英晶体谐振器的两个电极加交变电压，晶体将产生机械形变振动，而这一振动又会产生交变电场，这种现象称为压电效应。通常它们的振幅都很小，但当外加交变电压的频率正好等于石英晶体的固有频率时，振幅突然加大，这种现象称为谐振。因此，石英晶体谐振器可等效为一个的 LC 谐振电路，和其他元件组合即构成石英晶体振荡器，如图 4-20 所示。

石英晶体振荡器的突出优点是振荡频率非常稳定，常用于电子钟、精确计时仪器和通信设备上。



【知识拓展】实用门铃电路

图 4-22 是一种能发出“叮、咚”声的门铃电路。它是利用一块时基电路集成块和外围元件组成的。它的音质优美逼真，装调简单容易，成本较低，一节 6V 叠层电池可用 3 个月以上，耗电量较低。

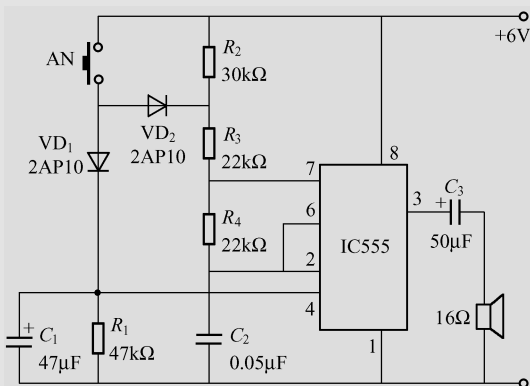


图 4-21 叮咚门铃电路

图 4-21 中的 IC 便是时基电路集成块 555，它构成无稳态多谐振荡器。按下按钮 AN（装在门上），振荡器振荡，振荡频率约为 700Hz，扬声器发出“叮”的声音。与此同时，电源通过二极管 VD_1 给 C_1 充电。放开按钮时， C_1 便通过电阻 R_1 放电，维持振荡。但由于 AN 的断开，电阻 R_2 被串入电路，使振荡频率有所改变，大约为 500Hz 左右，扬声器发出“咚”的声音。直到 C_1 上电压放到不能维持 555 振荡为止。“咚”声的余音的长短可通过改变 C_1 的数值来改变。

4.3 功率放大器

4.3.1 概述

一般电子设备采用多级放大电路来完成信号的放大，而在最后一级总是用来推动负载工作的。例如，使扬声器发出悦耳动听的声音，使电动机旋转，使继电器吸合，使仪表指针偏转等。因此要求电子设备输出功率要大，即不但要向负载提供大的信号电压，而且要向负载提供大的信号电流。这种以供给负载足够大的信号功率为目的的输出级称为功率放大器。

1. 功率放大器的特点

功率放大器的主要任务是放大信号的功率，它的输入/输出电压和电流都较大，通常放大器是在大信号状态下工作的。因此，一个性能良好的功率放大器应具备以下特点。

(1) 有足够的输出功率。为了获得大功率输出，功率放大器往往工作在接近极限运用状态。

(2) 电路效率高。由于功率放大器输出功率大，使直流电源消耗的功率也大，所谓效率高，也就是负载得到的有用信号功率与电源供给的直流功率的比值大。

(3) 信号失真小。由于功率放大器是在大信号下工作，不可避免地会进入三极管特性曲线的非线性区引起非线性失真，且输出功率越大时非线性失真越严重，这就使得输出功率和非线性失真成为一对主要矛盾。但是，在不同场合下，对非线性失真的要求有所不同，可视具体情况而定。

(4) 电路的散热性能好。由于有相当大的功率消耗在功率放大器的集电极上，使结温和管壳温度升高，因此，功率放大器必须具有良好的散热条件，以保证功率放大器输出足够大的功率。

2. 功率放大器的分类

(1) 功率放大器按工作方式分有甲类放大、乙类放大和甲乙类放大三种。

输入信号的整个周期都使三极管产生得到了集电极信号电流，这种工作方式称为甲类放大。例如，前面介绍的电压放大器就是甲类放大。而输入信号仅半个周期使三极管产生得到了集电极信号电流，这种工作方式称为乙类放大。

甲类放大由于功率放大器始终导通，静态工作点比较适中，因此失真很小。但随之带来的是耗电多、效率低，在理想情况下效率仅为 50%。乙类放大由于功率放大器只有半个周期内导通，因此耗电少、效率高，在理想情况下效率可达 34.5%。但乙类放大方式失真很大，必须构建相应的电路方可正常工作。

(2) 功率放大器按电路形式来分主要有单管功率放大器、变压器耦合功率放大器和互补推挽功率放大器三种。

4.3.2 射极输出器

射极跟随器如图 4-22 (a) 所示，因其输出电压是直接从发射极引出的，故称为射极输

出器，又名射极跟随器。

射极输出器的交流通路如图 4-22 (b) 所示，可见集电极是输入、输出回路的共同端点，因此射极输出器是共集电极电路。

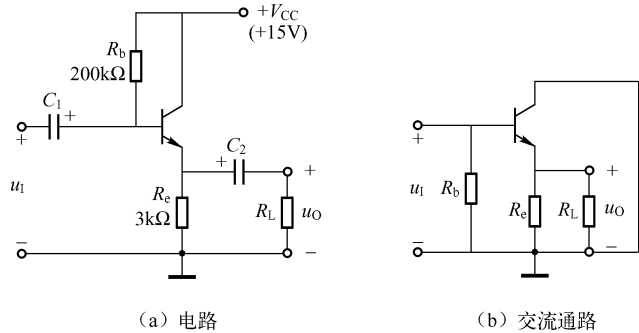


图 4-22 射极跟随器

4.3.3 互补推挽功率放大器

1. 电路结构

OCL 电路如图 4-23 (a) 所示，它采用双电源供电， V_1 采用 NPN 型管， V_2 采用 PNP 型管，要求两管的特性相同。由图 4-23 (a) 可见，两管的基极和基极相连、发射极和发射极相连，信号由基极输入，发射极输出，负载接在发射极上。因此可见，它是由两个射极输出器组合而成的。

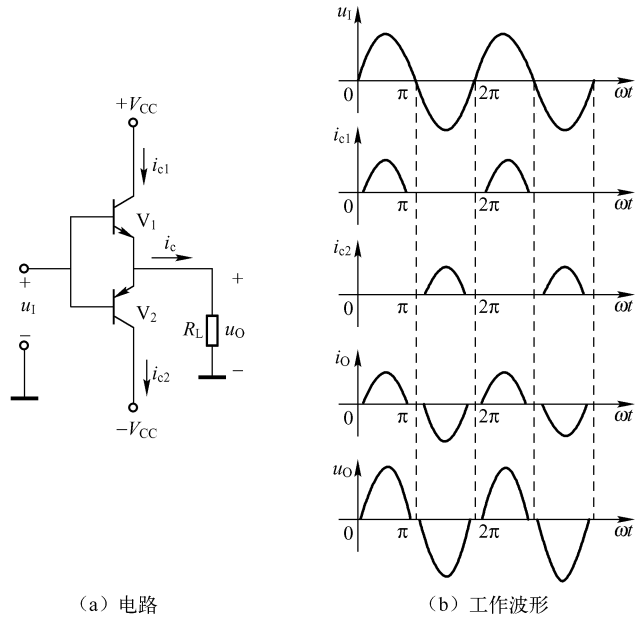


图 4-23 OCL 电路及波形

2. 电路工作原理

(1) 静态时。由于两管均无直流偏置, 故 $I_B = 0$, 两管均截止, 集电极静态电流 $I_C = 0$, 因此放大电路处于乙类放大状态。放大器不放大信号时, 没有功耗, 有利于提高效率。

(2) 动态时。在 u_i 的正半周期内 ($0 < \omega t < \pi$), NPN 型管 V_1 因发射结正偏而导通, PNP 型管 V_2 因发射结反偏而截止。这时 i_{c1} 自电源 V_{CC} 流经 V_1 、 R_L 到地, 产生输出电压的正半周波形。在 u_i 的负半周期内 ($0 < \omega t < 2\pi$), 情况正好相反, V_1 截止, V_2 导通, 这时 i_{c2} 自地流经 R_L 、 V_2 到 $-V_{CC}$, 产生输出电压的负半周波形, 如图 4-23 (b) 所示。

由此可见, 每一个三极管都工作在乙类状态, 即 V_1 、 V_2 都只有半个周期导通, 但由于在输入信号的整个周期中, 它们交替轮流导通, 一个“推”、一个“拉”, 互相补充, 结果在负载 R_L 上合成一个完整的信号波形, 称为互补推挽功率放大器。

4.4 集成运算放大器

4.4.1 差动放大电路

1. 直流放大器中的零点漂移

由于集成电路内部多采用直流放大器, 这是一种直接耦合的多级放大电路。普通的电压放大电路由于受外界因素的影响, 如温度的变化、电源电压的波动、晶体管参数的变化等, 将引起放大电路中各级静态工作点发生变化。而静态工作点的变化又将直接耦合传送到下一级并被放大。尤其是第一级的静态电位的变化, 经过逐级放大, 直到输出级。这样, 即使在输入信号 u_i 为零的情况下, 在输出端仍有较大的输出电压 u_i , 我们把这种输入为零输出却不为零的现象称为零点漂移 (简称零漂)。当零漂严重时, 有可能淹没需要放大的有用信号, 导致放大器无法正常工作, 因此需要抑制。有效抑制零漂的方法是采用差动放大电路。

2. 差动放大电路抑制零漂的基本原理

如图 4-24 所示是一个基本差动放大电路, 它是由两个完全对称的单管放大电路组合而成。输出电压 ΔU_o 从两管的集电极之间取出, 即 $\Delta U_o = \Delta U_{O1} - \Delta U_{O2}$ 。

(1) 静态。电路在静态时无任何输入信号, 即 $\Delta U_i = 0$, 由于电路左右两边完全对称, 静态值完全相同, 故 $\Delta U_{O1} = \Delta U_{O2}$, 因此: $\Delta U_o = \Delta U_{O1} - \Delta U_{O2} = 0$, 实现了零输入、零输出的要求。

(2) 动态。当外界因素发生变化时, 两管的静态值同时发生漂移。例如, 温度上升时 I_{C1} 和 I_{C2} 同时增大, 由于 $U_{C1} = V_{CC} - I_{C1} R_c$, $U_{C2} = V_{CC} - I_{C2} R_c$, 所以 U_{C1} 和 U_{C2} 同时下降。即两

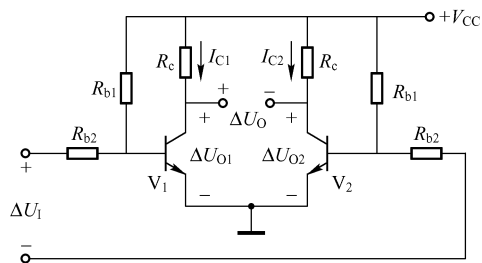


图 4-24 基本差动放大电路

管集电极电压变化量相等, 所以 $\Delta U_o = \Delta U_{o1} - \Delta U_{o2} = 0$, 这就表明零漂因两管对称而抵消了。显然差动放大电路两边对称性越好, 零漂电压就被抑制得越小。

3. 差动放大电路放大原理

当有差模信号同时输入如图 4-24 所示差动放大电路中时, 对于 V_1 , 因 $\Delta U_{i1} > 0$, I_{B1} 、 I_{C1} 都增大, $U_{C1} = V_{CC} - I_{C1} R_c$ 就要下降, 即输出电压 $\Delta U_{o1} < 0$; 对于 V_2 , 因 $\Delta U_{i2} < 0$, I_{B1} 、 I_{C1} 都减小, $U_{C2} = V_{CC} - I_{C2} R_c$ 就要上升, 即输出电压 $\Delta U_{o2} > 0$ 。由于电路对称, 所以两管输出电压增大和减小的数量相等, 因此两管集电极输出电压为 $\Delta U_{od} = \Delta U_{o1} - \Delta U_{o2} = 2\Delta U_{o1}$ 。可见在差动放大电路中, 只有当两个输入端之间有电位差时, 输出端之间才有电压的变动。差动放大电路正是基于这个原理对差模信号进行放大的, 也就是把这个电路称为差动放大电路的原因。

4.4.2 集成运算放大器的组成、结构、主要参数及工作特点

集成运放实际上是一种放大倍数很高、直接耦合的集成电路放大器, 简称集成运放。集成运放最初作为运算放大电路用于模拟计算机中。由于在集成运放的输入端和输出端之间外加不同的网络即可组成具有各种功能、不同用途的电路, 因此集成运放已远远超出原来的运算放大的范围, 而广泛应用于工业自动控制、精密检测系统等领域。

1. 集成运放的组成

集成运放通常由输入级、中间级、输出级和偏置电路组成。输入级要求输入电阻高, 而且要能有效地放大有用信号抑制无用信号, 因此都采用差动放大电路; 中间级要有足够大的电压放大倍数; 输出级要求输出电阻小、带负载能力强。集成运放的偏置电路为各级电路提供稳定的直流偏置电流和工作电流。

2. 集成运放的结构及电路符号

如图 4-25 所示为基本集成运放的引脚排列及电路符号。图 4-25 中, 外接了调零电位器, 有的系列的集成运放已无须外接调零电位器。集成运放通常采用对称的正、负电源同时供电。

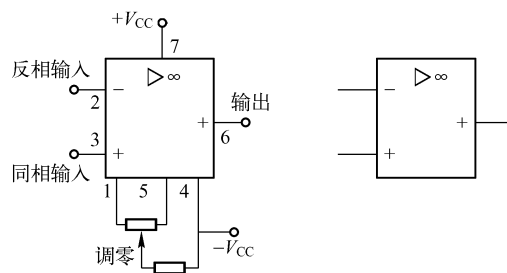


图 4-25 基本集成运放的引脚排列及电路符号

集成运放有两个输入端, 一个输出端。如果输入信号 u_i 加在反相输入端, 称为反相输入方式, 此时输出信号和输入信号相位相反; 如果输入信号 u_i 加在同相输入端, 称为同相

输入方式,此时输出信号和输入信号相位相同;当然输入信号也可同时加在两个输入端,称为双端输入方式,或称为差动输入方式。为了使电路图更加清晰明了,以后集成运放的电路符号一般不再标出电源端和其他引脚端,如图4-25所示的电路符号。

几种通用型集成运放的外形如图4-26所示,它的外形通常有圆壳式、双列直插式和扁平式三种。

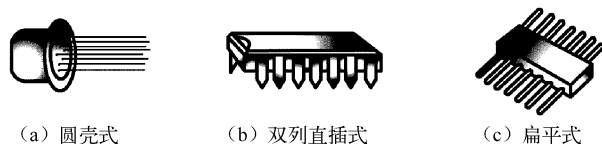


图4-26 集成运放的外形

线性集成电路中应用最广泛的就是集成运放,由于在集成运放的输入和输出之间外加不同的反馈网络,即可组成各种用途的电路,因而被誉为“万能放大器”。

3. 集成运放的主要参数

(1) 输入失调电压 U_{I0} 。一个理想的集成运放,当输入电压为零时 ($u_i = 0$), 输出电压也为零 ($u_o = 0$)。但实际上由于集成运放输入级的差动管不对称,通常在输入电压为零时,存在一定的输出电压,这种现象称为静态失调。把这个输出电压折算到输入端就是输入失调电压 U_{I0} 。显然 U_{I0} 越小越好, U_{I0} 越小表明电路匹配越好。

(2) 输入偏置电流 I_{IB} 与输入失调电流 I_{I0} 。一个理想集成运放的两个输入端电流完全相等。实际上,当集成运放的输出电压为零 ($u_o = 0$) 时,流入两个输入端的电流 I_{B1} 和 I_{B2} 不等。 I_{B1} 与 I_{B2} 之差称为输入失调电流 I_{I0} , 即 $I_{I0} = I_{B1} - I_{B2}$, 它反映集成运放输入级电流的不对称程度。 I_{I0} 值越小越好。如图4-27所示,当输出电压为零 ($u_o = 0$) 时,流入两输入端的静态电流的平均值称为偏置电流,即 $I_{IB} = (I_{B1} + I_{B2})/2$ 。

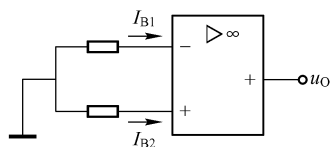


图4-27 输入偏置电流

(3) 开环电压放大倍数。它是指集成运放无外加反馈回路情况下的开环差模电压放大倍数,即 $A_{od} = U_{od}/U_{id}$, A_{od} 越大,运算精度就越高。

(4) 共模抑制比 K_{CMR} 。差模电压放大倍数 A_{od} 与共模电压放大倍数 A_{oc} 之比称为共模抑制比 K_{CMR} , 即 $K_{CMR} = |A_{od}/A_{oc}|$ 。 K_{CMR} 越大表示集成运放抑制共模信号能力越强。

(5) 输入电阻 r_{id} 与输出电阻 r_{od} 。 r_{id} 是指输入差模信号时,集成运放的开环输入电阻。 r_{od} 是指运放本身输出级的开环输出电阻, r_{od} 越小表示集成运放带负载能力越强。

(6) 最大输出电压 U_{OM} 。输出端开路时,集成运放能输出的最大不失真电压峰值。

(7) 最大输出电流 I_{OM} 。 I_{OM} 是指集成运放在不失真条件下的最大输出电流。

4. 集成运放的工作特点

1) 集成运放线性应用的条件和特点

(1) 集成运放线性应用的必要条件

集成运放加上负反馈网络,可以组成各种运算电路,实现各种数学运算,如比例、加、

减、乘、除、积分、微分等运算电路，此外还可组成电压—电流转换、正弦波发生器等应用电路。这些应用的必要条件是集成运放必须引入深度负反馈。

(2) 集成运放线性工作区的特点

① 虚短。由于集成运放的开环放大倍数 A_{od} 很大，而输出电压是一个有限值，因而集成运放两个输入端之间的电压很小，可以认为近似等于零。即 $u_i = U_+ - U_- = u_o/A_{od} \approx 0$ ，则

$$U_+ \approx U_-$$

因 U_+ 与 U_- 之间不是真的短路，故称“虚短”。

② 虚断。由于集成运放的输入电阻很大，因此集成运放流入两个输入端的电流很小，可以认为近似等于零，即

$$I_+ \approx I_- \approx 0$$

因两个输入端不是真的断开，故称“虚断”。

虚短和虚断这两个结论是分析集成运放线性区应用的重要依据，它简化了集成运放电路的分析和计算过程。

2) 集成运放非线性应用的特点和条件

(1) 集成运放非线性应用的必要条件

集成运放非线性应用的必要条件是集成运放处于开环状态或引入正反馈。当集成运放处于开环状态或引入正反馈时，只要在输入端输入很小的电压变化量，输出端输出的电压即为正最大输出电压 $+U_{OM}$ 或负最大输出电压 $-U_{OM}$ 。

(2) 集成运放非线性应用的特点

集成运放非线性的输出电压只有两种可能的状态：正最大输出电压 $+U_{OM}$ 或负最大输出电压 $-U_{OM}$ 。

$$\text{当 } U_+ > U_- \text{ 时, } u_o = +U_{OM}$$

$$\text{当 } U_+ < U_- \text{ 时, } u_o = -U_{OM}$$

集成运放的输入电流等于零。由于运放的输入电阻 $r_{id} = \infty$ ，因此，虽然 $U_+ \neq U_-$ ，输入电流仍然为零。

总之，在分析集成运放的应用电路时，应判断其中的集成运放是否工作在线性区，在此基础上，根据线性区或非线性区的特点分析具体电路的工作原理。

4.4.3 集成运算放大器的应用

1. 集成运算放大器的线性应用

集成运算放大器的线性应用主要是比例运算电路，有同相输入比例运算和反相输入比例运算两种，它们是最基本的运算电路，是其他各种运算电路的基础。

1) 反相输入比例运算电路

反相输入比例运算电路如图 4-28 所示。图 4-28 中，输入电压 u_i 通过外接电阻 R_1 加在反相端上，同相端经过平衡电阻 R' 接地，输出电压 u_o 经过 R_f 接回反相端，形成一个深度电压并联负反馈，故该电路工作在线性区。

由于线性区的特点，有： $U_+ = U_-$ （虚短）、 $I_+ = I_- = 0$ （虚断）。

根据虚断，可知同相输入端的输入电流为零，在 R' 上没有形成电压降，因此 $U_+ = 0$ 。

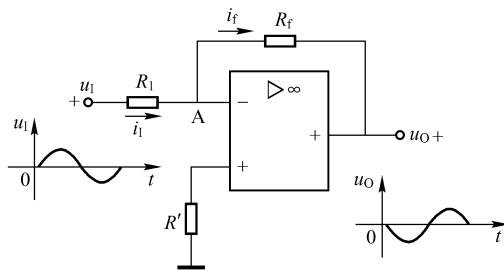


图 4-28 反相输入比例运算电路

根据虚短, $U_+ = U_-$, 所以 $U_- = 0$, 即 A 点的电位等于零 ($U_A = 0$), 这种现象称为虚地。虚地是反相输入运算放大电路的一个重要特点。因为从 A 点流入运放的电流为零 ($I_- = 0$), 所以有 $i_1 = i_f$, 因此有

$$\frac{u_1 - U_-}{R_1} = \frac{U_- - u_0}{R_f}$$

又由于 $U_- = 0$, 可求得输出电压和输入电压的关系为

$$u_0 = -\frac{R_f}{R_1}u_1$$

可见, 输出电压 u_0 与输入电压 u_1 成比例, 式中的负号表示输出电压 u_0 与输入电压 u_1 反相。对于正弦信号, u_0 与 u_1 相位相反; 对于直流信号, u_0 与 u_1 正负极性相反。

【例 4-1】 图 4-28 电路中, 已知 $R_1 = R_f = 10\text{k}\Omega$, $R' = 5\text{k}\Omega$, $u_1 = 10\text{mV}$, 试求输出电压 u_0 。

解: $u_0 = - (R_f/R_1)u_1 = -10\text{mV}$ 。

根据运算结果可知输出电压 u_0 与输入电压 u_1 大小相同, 极性相反。故该电路通常称为“倒相电路”(或变号运算电路)。

2) 同相输入比例运算电路

同相输入比例运算电路如图 4-29 所示, 输入电压 u_1 通过 R' 加在同相端上, 反相端经过 R_1 接地, 输出电压 u_0 经过 R_f 接回反相端, 形成一个深度电压串联负反馈。故该电路工作在线性区。

由于线性区的特点, 有: $U_+ = U_-$ (虚短)、 $I_+ = I_- = 0$ (虚断)。

根据虚断, $I_+ = I_- = 0$, 故在 R' 上没有电压降, 所以 $U_+ = u_1$ 。

根据虚短, $U_- = U_+ = u_1$, 即 A 点的电位等于输入信号。

由图 4-29 可知:

$$U_- = U_+ = u_0 \frac{R_1}{R_1 + R_f}$$

式中 $U_+ = u_1$, 可求得输出电压和输入电压的关系为

$$u_0 = u_1 \frac{R_1 + R_f}{R_1} = u_1 \left(1 + \frac{R_f}{R_1} \right)$$

可见, 输出电压与输入电压成比例, 且 u_0 与 u_1 的变化方向相同, 即同相关系。

【例4-2】电路如图4-30所示，已知 $u_1 = 10\text{mV}$ ，试求输出电压 u_o 。

解：由于 $U_- = U_+ = u_1$ ，故 $u_o = u_1 = 10\text{mV}$ 。

从运算结果可知输出电压 u_o 与输入电压 u_1 大小相同，极性相同，称为“电压跟随器”。

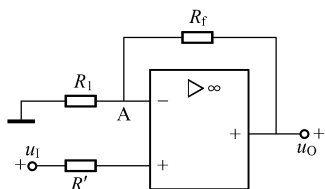


图 4-29 同相比例运算电路

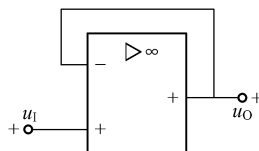


图 4-30 电压跟随器

2. 集成运算放大器的非线性应用

当集成运放处于开环状态或引入正反馈，则集成运放工作在非线性区域，电压比较器就是集成运算放大器的非线性应用。

1) 电压比较器

如图4-31（a）所示为简单电压比较器，运放电路处于开环状态，输入信号 u_1 从反相端加入，同相端加参考电压 U_R ，输出电压为 u_o 。

因理想情况下运放的开环电压放大倍数 $A_{od} = \infty$ ，输入偏置电流 $I_{IB} = 0$ ，输入失调电压 $U_{io} = 0$ ，当反相端电位高于同相端电位，即 $U_- > U_+$ 时，输出 u_o 为低电平（ $u_o = -U_{OM}$ ）；当 $U_- < U_+$ 时，输出 u_o 为高电平（ $u_o = +U_{OM}$ ）。 $-U_{OM}$ 和 $+U_{OM}$ 为运放的正、反向饱和电压。

如果将参考电压 $U_R = 0$ ，则意味着，如果 $u_1 < 0$ 时， u_o 输出高电平；如果 $u_1 > 0$ 时， u_o 输出低电平。根据这一结果，可以将正弦交流电作为 u_1 输入，则在输出端产生一个方波，即将正弦波转换成了方波，波形图如图4-31（b）所示。

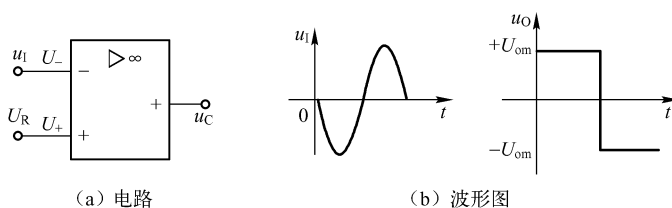


图 4-31 简单电压比较器

2) 方波发生器

利用电压比较器和电容的充放电可组成方波信号发生器，如图4-32所示。

电路的工作过程如下： U_+ 的大小由 R_1 和 R_2 分压从双向稳压二极管取得。接上电源后，电源对 C 进行充电，在充电初期，由于所充电压较低， $U_- < U_+$ ，电路输出 u_o 为高电平。由

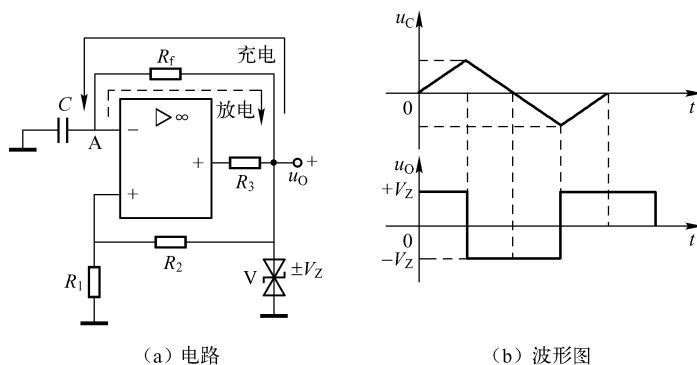


图 4-32 方波发生器

于受稳压管的钳制，使得 $u_o = +V_Z$ 。随着充电的进行，一旦 $U_- > U_+$ 时，输出翻转，输出 u_o 为低电平，使得 $u_o = -V_Z$ ，输出如图 4-32 所示的方波。



【知识拓展】集成运放的发展概况

集成运放自 20 世纪 60 年代问世以来，飞速发展，目前已经历了四代产品。

第一代产品基本沿用了分立元件放大电路的设计思想，采用了集成数字电路的制造工艺，利用了少量横向 PNP 管，构成了以电流源做偏置电路的三级直接耦合放大电路。但是，它各方面性能都远远优于分立元件电路，满足了一般应用的要求。典型新产品有 $\mu A709$ 、国产的 F003、5G23 等。

第二代产品普遍采用了有源负载，简化了电路的设计，并使开环增益有了明显的提高，各方面性能指标比较均衡，因此属于通用型运放，应用非常广泛。典型产品有 $\mu A741$ 、LM324、国产的 F007、F324、5G24 等。

第三代产品的输入级采用了超 β 管， β 值高达 1000 ~ 5000 倍，而且版图设计上考虑了热效应的影响，从而减小了失调电压、失调电流及它们的温漂，增大了共模抑制比和输入电阻。典型产品有 AD508、MC1556、国产的 F1556、F030 等。

第四代产品采用了斩波稳零和动态稳零技术，使各性能指标参数更加理想化，一般情况下无须调零就能正常工作，大大提高了精度。典型产品有 HA2900、SN62088、国产的 5G7650 等。

目前，除有不同增益的各种通用型运放外，还有品种繁多的特殊型运放，以满足各种特殊要求。



【本章小结】

(1) 为了保证进行不失真的放大，放大电路必须设置静态工作点。放大电路中有交流和直流两种成分，交流附载在直流上，直流是基础，交流是目的。

(2) 多级放大器的耦合方式有阻容耦合、直接耦合和变压器耦合。集成运放电路其内部是一个高增益的、直接耦合放大电路。

(3) 反馈的实质是输出量参与控制，负反馈能改善放大器性能，但是以牺牲放大倍数为代价。

(4) 正弦波振荡器实质上是一个满足相位平衡条件和幅度平衡条件的正反馈放大器。按照选频网络的不同正弦波振荡器可分为 LC 振荡器、RC 振荡器和石英晶体振荡器。

(5) 功率放大器和电压放大器本质上都是能量转换器。互补推挽功率放大器中三极管只在信号的半个周期内导通工作，称为乙类工作状态。

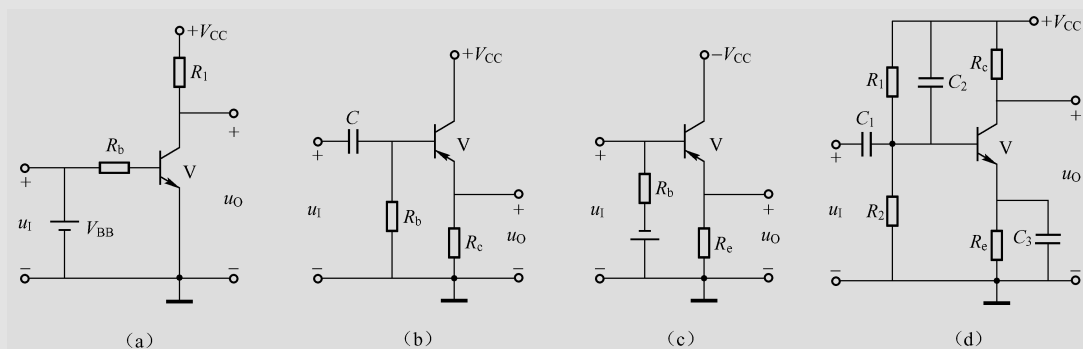
(6) 集成运放的应用分为线性与非线性两类。

【习题四】

4.1 在括号内用“√”或“×”表明下列说法是否正确。

- (1) 只有电路既放大电流又放大电压，才称其有放大作用。 ()
- (2) 可以说任何放大电路都有功率放大作用。 ()
- (3) 放大电路中输出的电流和电压都是由有源元件提供的。 ()
- (4) 电路中各电量的交流成分是交流信号源提供的。 ()
- (5) 放大电路必须加上合适的直流电源才能正常工作。 ()
- (6) 由于放大的对象是变化量，所以当输入信号为直流信号时，任何放大电路的输出都毫无变化。 ()
- (7) 只要是共射放大电路，输出电压的底部失真都是饱和失真。 ()

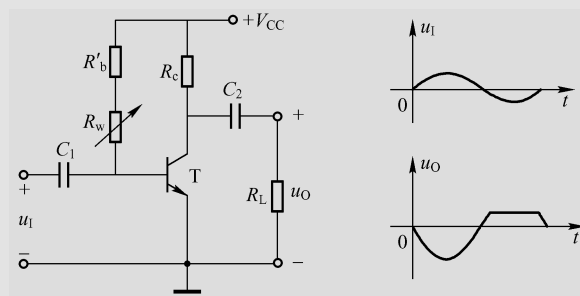
4.2 试分析图题 4-1 所示各电路是否能够放大正弦交流信号，并简述理由（设图题 4-1 中所有电容对交流信号均可视为短路）。



图题 4-1

4.3 在图题 4-2 所示的放大电路中，若输入信号电压波形如图题 4-2 所示，试问：

- (1) 输出电压发生了何种失真？
- (2) 应如何调整来消除失真？
- (3) 图题 4-2 中偏流电阻为什么要分成固定和可调两部分，如果只装一个可调电阻会有什么问题？



图题 4-2

4.4 已知某多级放大电路的各级电压放大倍数分别是 100、1、10，分别求：

(1) 各级总的电压放大倍数；

(2) 若输入信号电压为 5mV，则输出电压有多大？

4.5 试从反馈观点比较反相输入和同相输入两种比例运算电路的特点。

第5章 直流稳压电源

【主要内容】

- ☺ 整流滤波电路。
- ☺ 稳压电路。
- ☺ 晶闸管可控整流电路。

【重点和难点】

- ☺ 滤波电路的工作原理。
- ☺ 晶闸管可控整流电路的结构与工作原理。

5.1 整流滤波电路

交流电在电能的输送和分配方面具有直流电不可比拟的优点，因此电力网所供给的是交流电。但有些场合又必须使用直流电，要求高的电路还必须用到非常稳定的直流电源。所以，通常要把交流电转换成直流电。目前，广泛采用的办法是利用二极管或晶闸管等半导体器件的特性，把交流电转换成直流电。我们把这种转换电路称为直流稳压电源电路。直流稳压电源的组成框图如图 5-1 所示。

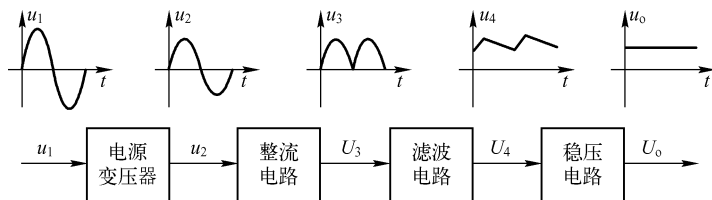


图 5-1 直流稳压电源的组成框图

图 5-1 中，各组成部分的作用如下。

- (1) 电源变压器：将交流电压变换成符合整流要求的交流电压值。
- (2) 整流电路：将交流电压变换成单向脉动直流电压。
- (3) 滤波电路：将脉动直流电压变换成平滑的直流电压。
- (4) 稳压电路：使输出直流电压保持一个稳定值。

5.1.1 单相整流电路

整流就是把交流电转换成脉动的直流电。按所用交流电源的相数，可分为单相和三相整

流；按负载上所得整流波形，可分为半波和全波整流。本节介绍单相整流电路。

1. 半波整流电路

如图 5-2 (a) 所示为带有纯电阻负载的单相半波整流电路。它是最简单的整流电路，常用于对电压要求不高的场合。它由变压器、整流二极管、负载组成。变压器将外界交流电压变换成符合整流要求的交流电压，波形图如图 5-2 (b) 所示。

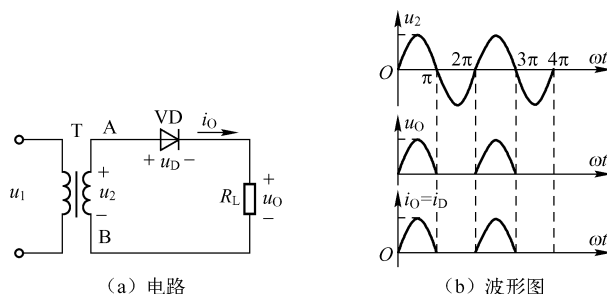


图 5-2 单相半波整流电路及波形图

半波整流工作过程如下。

在 u_2 正半周 (A 端为正、B 端为负) 时，二极管 VD 正偏导通，电流的路径为：A 端 \rightarrow V $\rightarrow R_L \rightarrow$ B 端。由于二极管正向导通，于是有电流 i_0 流过 R_L ，产生电压 u_0 。若忽略变压器 T 的线圈电阻和二二极管正向电阻，则 u_0 瞬时值就是 u_2 。故 u_0 的波形近似为 u_2 的正半周波形。

在 u_2 负半周 (A 端为负、B 端为下) 时，二极管 VD 反偏截止，无电流流过 R_L ， R_L 上无电压。

因此整流后，负载 R_L 上得到的是半个正弦波，即脉动的直流电压 u_0 。

如果设变压器二次电压 u_2 的有效值是 U_2 ，则负载 R_L 上所获得的直流电压是 U_0 ，即 u_0 的平均值为

$$U_0 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 0.45 U_2$$

流过负载的平均电流为

$$I_0 = \frac{U_0}{R_L} = 0.45 \frac{U_2}{R_L}$$

因为二极管 VD 和 R_L 相串联，所以流过二极管 VD 的平均电流为

$$I_V = I_0 = 0.45 \frac{U_2}{R_L}$$

二极管在截止的半个周期内承受的最高反向电压为

$$U_{RM} = \sqrt{2} U_2$$

半波整流电路虽然结构简单，但输出电压脉动大，直流电压小。为了克服这些缺点，目前广泛采用单相全波桥式整流电路。

2. 单相桥式整流电路

单相桥式整流电路是在半波整流的基础上改良的，它克服了半波整流的一些缺点。电路

是由 4 个二极管构成一个电桥来承担整流任务的，因此命名为桥式整流电路，如图 5-3 (a) 所示。

单相桥式整流电路工作过程如下。

1) 正半周工作过程

在 u_2 正半周 (A 端为正、B 端为负) 时， VD_1 、 VD_3 因正偏同时导通 (此时 VD_2 、 VD_4 由于反偏而截止)。

电流的路径是： $A \rightarrow VD_1 \rightarrow R_L \rightarrow VD_3 \rightarrow B$ ，流经 VD_1 、 VD_3 的电流 i_{13} 自上而下流过 R_L ，形成负载电流 i_o (见图 5-3 (a) 中实线所示)，产生负载电压 u_o 。

可以看出，如果忽略变压器电阻和二二极管的正向导通电阻， u_o 和 u_2 的正半周是一样的，同为半个正弦波，如图 5-3 (b) 所示。

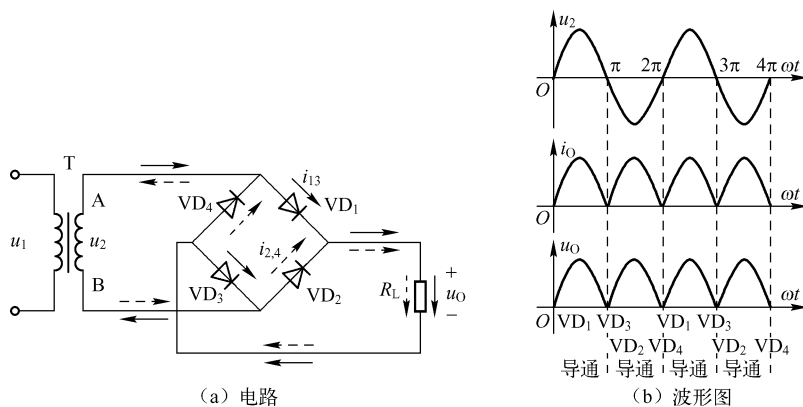


图 5-3 单相桥式整流电路及波形图

2) 负半周工作过程

在 u_2 负半周 (A 端为负、B 端为正) 时， VD_2 、 VD_4 因正偏同时导通 (此时 VD_1 、 VD_3 由于反偏而截止)。

电流的路径是： $B \rightarrow VD_2 \rightarrow R_L \rightarrow VD_4 \rightarrow A$ ，流经 VD_2 、 VD_4 的电流 i_{24} 也是自上而下流过 R_L ，形成负载电流 i_o ，如图 5-3 (a) 中虚线所示，产生负载电压 u_o 。

可以看出，如果忽略变压器电阻和二二极管的正向导通电阻， u_o 和 u_2 的负半周是一样的，同为半个正弦波，如图 5-3 (b) 所示。

由此可见，在一个周期内， VD_1 、 VD_3 和 VD_2 、 VD_4 轮流导通，无论是在 u_2 正半周还是负半周，负载上都可以得到了单一方向的脉动直流电压，因此称为全波整流。

如图 5-4 所示为桥式整流电路的其他画法。

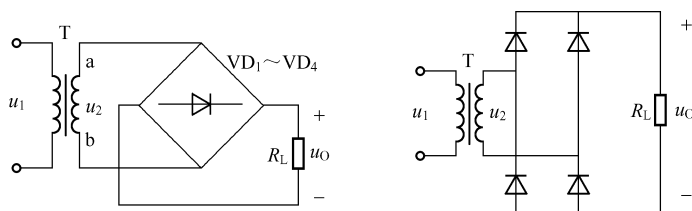


图 5-4 桥式整流电路的其他画法

与半波整流相比, 由于 R_L 负载上的直流电压 U_0 是半波整流时的 2 倍, 所以输出的直流电压 U_0 为

$$U_0 = (2 \times 0.45) U_2 = 0.9 U_2$$

流过负载的平均电流为

$$I_0 = \frac{U_0}{R_L} = 0.9 \frac{U_2}{R_L}$$

流过每个二极管的平均电流为负载平均电流的一半, 即

$$I_V = 0.5 I_0$$

每个二极管在截止时所承受的最高反向电压为

$$U_{RM} = \sqrt{2} U_2$$

5.1.2 滤波电路

整流得到的直流电脉动很大, 含有很大的交流成分, 这对电子仪器设备会带来不良影响。因此整流之后还需滤波, 即将脉动的直流电变成比较平滑的直流电。常用电容器、电感器等储能元件组成滤波电路。

1. 电容滤波

把电容器并联在负载两端就组成电容滤波电路。利用电容两端电压不能突变, 可使输出电压波形平滑。

1) 半波整流电容滤波电路

半波整流电容滤波电路及波形图如图 5-5 所示。起滤波作用的电容并联在负载电阻上。其电容滤波的原理是利用电容的充放电来进行的。图 5-5 (a) 是变压器二次侧的交流正弦电压 u_2 的波形; 图 5-5 (b) 是未接滤波电容时的输出电压 u_0 的波形; 图 5-5 (c) 为接入电容后, 电容上的电压波形。

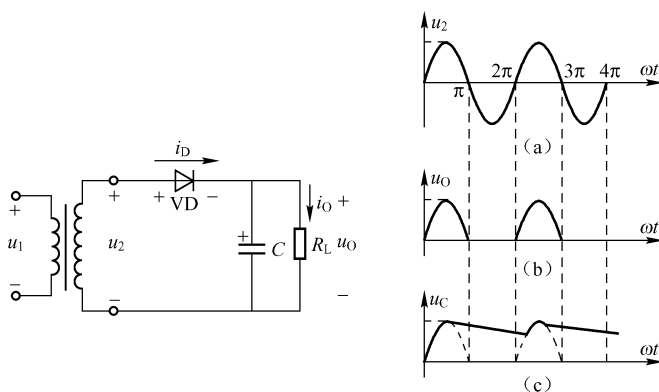


图 5-5 半波整流电容滤波电路及波形图

电路在未接滤波电容时, 输出电压 u_0 的波形虽然也属直流电, 但起伏很大, 含有很大的脉动成分, 这样的电压输出, 很多时候不能符合电路的要求。

当接入滤波电容后, 在 $0 \sim \pi/2$ 的时间内, 电容处于充电的过程中, 当 u_0 达到最大值

时, 电容也充电完毕, 其值 u_c 约等于 u_0 的最大值。在 $\pi/2$ 之后, u_0 开始下降, 此时电容开始放电, 如果电容足够大, 使放电缓慢, 则 u_c 上的电压并不会如 u_0 一样随 u_2 的变化而下降, 使 u_c 在一段时间内保证缓慢下降的趋势, 如图 5-5 (c) 中实线所示。

可以证明, 输出直流电压为

$$U_0 = U_2$$

2) 桥式整流电容滤波电路

桥式整流电容滤波电路如图 5-6 (a) 所示, 与半波整流电容滤波电路相比, 由于电容的充放电过程缩短, 为电源电压的半个周期重复一次, 因此输出电压的波形更为平滑, 输出的直流电压幅度也更高些, 波形图如图 5-6 (b) 所示。

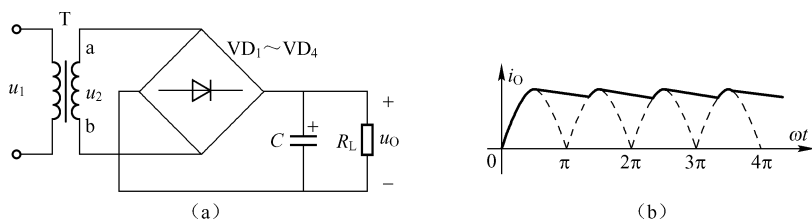


图 5-6 桥式整流电容滤波电路及波形图

可以证明, 输出直流电压为

$$U_0 \approx 1.2 U_2$$

电容滤波电路简单, 在电流不大时, 滤波效果较好, 一般用于负载电流较小且变化不大的场合, 如各种电子测量仪器、收录机、电视机等。但当负载电流较大即 R_L 较小时, 电容 C 放电快, 波形平滑程度差, U_0 下降, 即电容滤波的外特性差 (带负载能力差), 不适用于负载电流大的场合。

除电容滤波外, 还可将电感元件与负载串联构成电感滤波电路, 利用电感元件在电流变化时产生感应电动势来抑制电流的脉动, 达到滤波的目的。电感滤波电路的外特性较好 (带负载能力强), 电感滤波电路适用于负载电流较大的场合, 缺点是体积大、笨重、成本高。

在实际应用中常常采用复式滤波电路, 即同时采用电容、电感元件, 可以取得更加理想的效果。图 5-7 是两种常见的复式滤波电路。

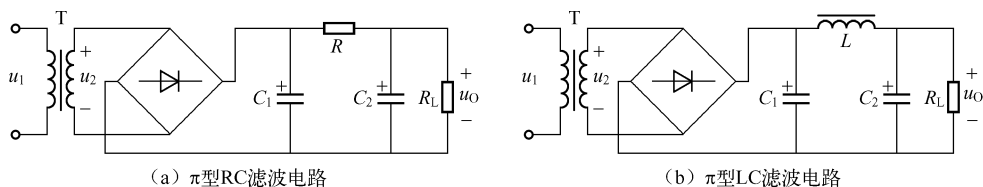


图 5-7 两种常见的复式滤波电路



【知识拓展】变压器的结构和工作原理

变压器几乎在所有的电子产品中都要用到, 它原理简单, 但根据不同的使用场合 (不同的用途) 变压器的绕制工艺会有所不同的要求。变压器的功能主要有: 电压变换;

阻抗变换；隔离；稳压（磁饱和变压器）等，变压器常用的铁芯形状一般有 E 形和 C 形铁芯。

变压器的工作原理是：当一个正弦交流电压 u_1 加在一次线圈两端时，导线中就有交变电流 i_1 并产生交变磁通，它沿着铁芯穿过一次线圈和二次线圈形成闭合的磁路。在二次线圈中感应出正弦交流电压 u_2 ，如果变压器二次侧接上负载，二次线圈就产生电流 i_0 。

如果不考虑变压器的损耗，可以认为一个理想的变压器二次侧负载消耗的功率也就是变压器一次侧从电源取得的电功率。变压器能根据需要通过改变二次线圈的圈数而改变二次电压，但是不能改变允许负载消耗的功率。变压器中需要用到以下材料。

(1) 铁芯材料。变压器使用的铁芯材料主要有铁片、低硅片、高硅片。在钢片中加入硅能降低钢片的导电性，增加电阻率，它可减少涡流，使其损耗减少。我们通常将加了硅的钢片称为硅钢片。变压器的质量和所用硅钢片的质量有很大关系，硅钢片的质量通常用磁通密度 B 来表示，一般黑铁片的 B 值为 6000 ~ 8000、低硅片为 9000 ~ 11000，高硅片为 12000 ~ 16000。

(2) 绕组线圈。绕组线圈材料有漆包线、沙包线、丝包线，最常用的漆包线。对于导线的要求是导电性能好、绝缘漆层有足够耐热性能，并且要有一定的耐腐蚀能力。一般情况下最好用 Q2 型号的高强度的聚脂漆包线。

(3) 绝缘材料。在绕制变压器中，线圈框架层间的隔离、绕阻间的隔离，均要使用绝缘材料，一般的变压器框架材料可用酚醛纸板制作，层间可用聚脂薄膜或电话纸做隔离，绕阻间可用黄腊布做隔离。

(4) 浸渍材料。变压器绕制好后，还要过最后一道工序，就是浸渍绝缘漆，它能增强变压器的机械强度、提高绝缘性能、延长使用寿命。一般情况下，可采用甲酚清漆作为浸渍材料。

5.2 稳压电路

如前所述，各种电子电路都需要直流电源供电。一般情况下，是将交流电源变换成直流电源进行供电。在经过变压、整流、滤波之后，得到一个相对较为平稳的直流电。在对电压要求不高的场合，这样的电压供给可以满足。但很多的场合需要精度高的电压，且不受外因的影响，这就需要稳压电路来完成这项工作。

5.2.1 硅稳压管稳压电路

1. 电路工作过程

如图 5-8 (a) 所示是由硅稳压管组成的直流稳压电源电路。图 5-8 (a) 中，变压器 T 起变压作用，得到电压 u_2 ，其波形如图 5-8 (b) 所示；4 个二极管构成全波桥式整流电路，将交流电转换成脉动的直流电，得到如图 5-8 (c) 所示的波形；电容 C 在这起滤波作用，将脉动的直流电转换成较平滑的直流电，滤波后得到如图 5-8 (d) 所示的波形；负载电阻

R_L 和硅稳压管 V 组成稳压电路, 将较平滑的直流电转换成稳定的直流电, 其波形如图 5-8 (e) 所示。

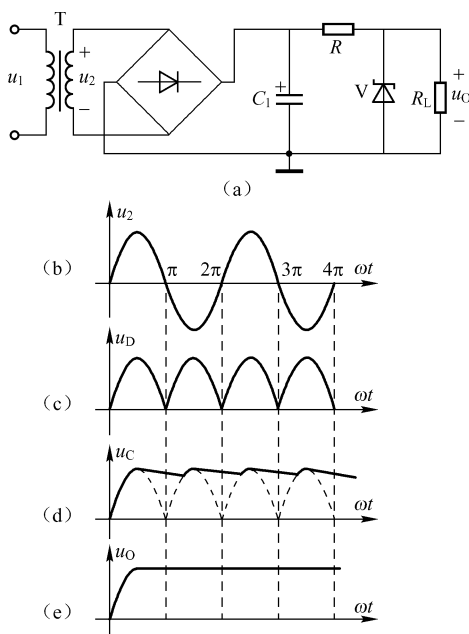


图 5-8 硅稳压管组成的直流稳压电源电路及波形图

2. 电路特点

当电网电压波动或负载变化时, 从图 5-8 (e) 可以看出, 电源电路始终输出稳定的直流电压。当然, 这种稳压电路输出电压取决于稳压二极管的稳定电压值, 并且输出电流也不能很大, 所以也只适合于一些小负载及稳定度要求不高的场合。

上述这种稳压电路由于稳压元件与负载是并联关系, 所以称为并联型稳压电源。除了并联型稳压电路, 还有串联型稳压电路, 其电路更为完善, 特性更加优良。目前, 应用最广泛的是三端集成稳压电路。

5.2.2 三端集成稳压器

集成稳压器是利用半导体工艺制成的集成器件, 其特点是体积小、稳定性高、性能指标好等, 已逐步取代了由分立元件组成的稳压电路。三端集成稳压器可分为三端固定式和三端可调式两大类。

1. 三端固定式集成稳压器

三端固定式集成稳压器外形与引脚排列如图 5-9 所示。

三端固定式集成稳压器有三个引出端, 输入端 1、输出端 2 和公共端 3 (注: 不同封装的集成稳压器的引脚功能不同, 请自行查阅相关资料)。三端固定式集成稳压器直接输出的是固定电压, 分为正电压输出 (有 LM38x x 系列等) 和负电压输出 (LM35x x 系列等)。x x 表示电压等级。如 5-9 所示的三端固定式集成稳压器输出的是 +12V, LM7912 输出的是

是 -12V 。

如图 5-10 所示为三端固定式集成稳压器的应用。图 5-10 中, C_1 的左边为桥式整流环节, C_1 是滤波电容, 三端式稳压器与 C_2 组成稳压环节。整流滤波的输出电压作为稳压器的输入电压, 稳压器的输出电压供给负载, C_2 为输出电容, 其作用是消除可能产生的振荡。适当配些外接元件, 能实现输出电压、输出电流的扩展。

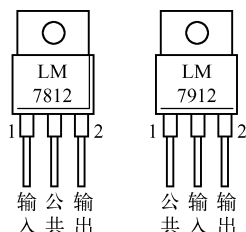


图 5-9 三端固定式集成稳压器
外形与引脚排列

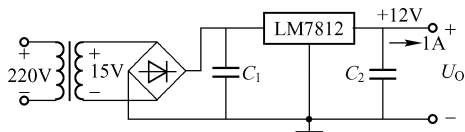


图 5-10 三端固定式集成
稳压器的应用

2. 三端可调式集成稳压器

三端可调式集成稳压器外形与引脚排列如图 5-11 所示。

三端可调式集成稳压器的三个引出端分别为调整端 1、输入端 2 和输出端 3 (注: 不同封装的集成稳压器的引脚功能不同, 请自行查阅相关资料) 其输出分为 CW317 正电压输出和 CW337 负电压输出。正电压输出时, 其调整端和输出端间内部电压恒等于 1.25V ; 负电压输出时, 其调整端和输出端间的内部电压恒等于 -1.25V 。三端可调式集成稳压器如图 5-12 所示, 其中 U_1 是整流滤波后的输出电压, R 、 R_P 用来调节输出电压, 为使电路正常工作, 其输出电流一般不小于 5mA , 调节端的电流很小可忽略, 因 1、3 端的电压恒等于 1.25V , 所以输出电压为

$$U_o = 1.25 \left(1 + \frac{R_{RP}}{R} \right)$$

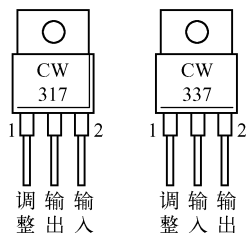


图 5-11 三端可调式集成稳压器
外形与引脚排列

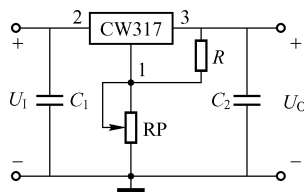


图 5-12 三端可调式集成
稳压器



【知识拓展】三端固定式集成稳压器引脚的判断技巧

在 $78 \times \times$ 、 $79 \times \times$ 系列三端稳压器中最常用的是 TO-220 和 TO-202 两种封装形式。这两种集成稳压器的引脚序号、引脚功能如图 5-13 所示。

图5-13 中的引脚号标注方法是按照引脚电位从高到低的顺序标注的。引脚1 为最高位，引脚3 为最低位，引脚2 居中。从图5-13 中可以看出，无论是78××的正压系列，还是79××的负压系列，引脚2 都为输出端。对于78××正压系列，输入端是最高电位，自然是引脚1；地端为最低电位，即引脚3。对于79××负压系列，输入端是最低电位，所以为引脚3，而地端是最高电位，对应为引脚1。

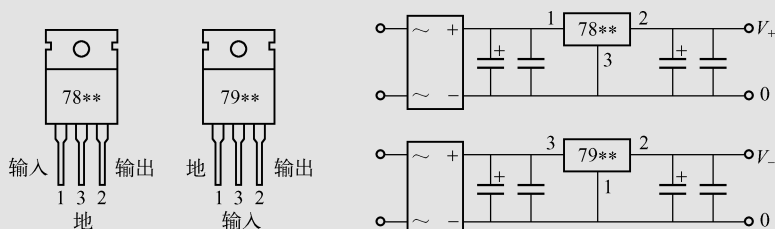


图5-13 集成稳压器的引脚序号、引脚功能

此外，还应注意，散热片总是和最低电位即和引脚3 相连接。这样，在78××正压系列中，散热片和地是相连的。而在79××负压系列中，散热片却和输入端相接，因而在使用中要注意安全。

5.3 晶闸管可控整流电路

晶闸管可控整流是把有效值不变的交流电变换成大小可调的直流电。它广泛应用于工业生产中，如为直流电机的调速、电解、电镀等提供可调的直流电源。如图5-14 所示为常见大功率晶闸管实物。

晶闸管可控整流电路通常由主电路和控制电路（触发电路）两部分组成。其框图如图5-15 所示。主电路主要是将交流电转换成可变的直流电，其内部核心元件为晶闸管。而控制电路是为晶闸管导通提供触发脉冲。可控整流电路输出电压为何会发生变化？下面介绍几种主电路。

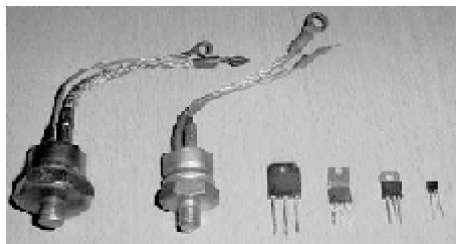


图5-14 常见大功率晶闸管实物

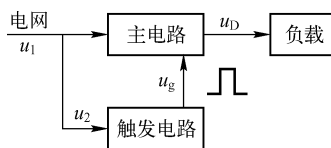


图5-15 晶闸管可控整流电路框图

5.3.1 单相半波可控整流电路

将单相半波整流电路中的二极管换成果闸管，即构成图5-16（a）所示的单相半波可控

整流电路。其中，晶闸管 V 和电阻 R_L 组成了主电路。控制极的触发脉冲由控制电路提供。

1. 整流工作原理

从图 5-16 (a) 可见：变压器 T 二次电压 u_2 ，经负载电阻 R_L 加在晶闸管阳极 A 与阴极 K 两端。

在 u_2 的正半周（A 端为正、B 端为负）：在 $0 \sim \omega t_1$ 期间，虽然晶闸管加上了正向电压，但因未加触发脉冲，晶闸管无法导通，处于正向阻断状态，此时 R_L 中没有电流流过，负载两端输出电压 u_0 为零，电源电压全部加在晶闸管两端， $u_D = u_2$ 。

在 ωt_1 时刻，门极加上了触发脉冲 u_g ，晶闸管被触发导通，此时电源电压全部降在负载两端，输出电压 $u_0 = u_2$ ，若忽略管压降（ $u_D = 0$ ），则流过负载的电流为 $i_0 = u_0 / R_L$ ， i_0 的波形与 u_0 的波形相似。

在 $\omega t = \pi$ 时刻，交流输入电压 u_2 过零，使流过晶闸管的电流降为零，晶闸管被关断，致使 $i_0 = 0$ 、 $u_D = u_2$ 。

在 u_2 的负半周（A 端为负、B 端为正），晶闸管承受反向电压，处于反向阻断状态， $u_D = u_2$ 使输出电压 $u_0 = 0$ ，直至下一个周期。

重复上述过程，这样就把输入的交流电 u_2 转换成脉动直流电 u_0 。波形图如图 5-16 所示，其中 u_2 为输入电压波形， u_g 为门极触发脉冲电压波形， u_0 为输出电压波形， u_D 为晶闸管两端的电压波形。

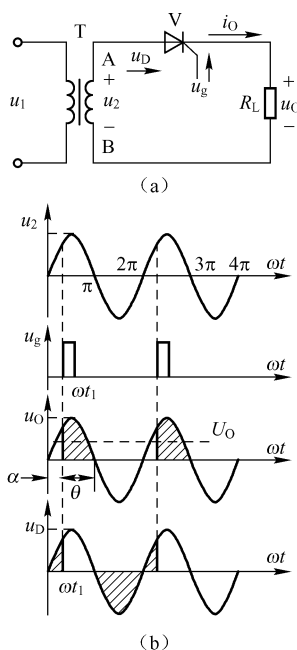


图 5-16 单相半波可控整流电路

2. 电压控制原理

在图 5-16 (b) 中， α 为控制角， θ 为导通角（ $\theta = \pi - \alpha$ ）。改变脉冲出现的时刻，即改变了控制角 α 的大小，从而改变了输出电压的大小，达到可控整流的目的。输出电压 U_0 为

$$U_0 = 0.45 U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

从上式可知：当 $\alpha = 0$ 时， $U_0 = 0.45 U_2$ ；当 $\alpha = \pi$ 时， $U_0 = 0$ 。故输出电压 U_0 的调节范围是 $(0 \sim 0.45) U_2$ 。输出电流平均值 I_0 为

$$I_0 = \frac{U_0}{R_L}$$

5.3.2 单相可控桥式整流电路

将单相桥式整流电路中的两个二极管换成晶闸管，即构成图 5-17 (a) 所示的单相可控桥式整流电路。其中，晶闸管 V_1 、 V_2 的阴极连在一起接成共阴极连接，只有承受正向阳极电压的管子才能触发导通，触发脉冲同时送给 V_1 、 V_2 的门极；整流二极管 V_3 、 V_4 的阳极连在一起接成共阳极连接，总是阴极电位低时管子才导通。该电路的触发电路较简单，广泛应用于中小容量可控整流装置中。

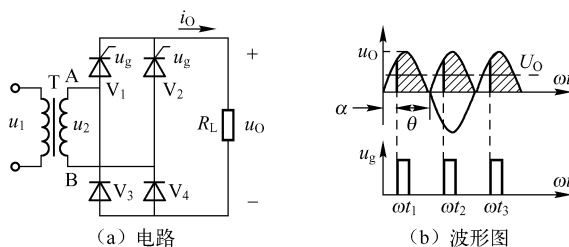


图 5-17 单相可控桥式整流电路及波形图

1. 整流工作原理

u_2 的正半周 (A 端为正、B 端为负): 晶闸管 V_1 的阳极电位最高有可能导通 (取决于是否触发), V_2 截止; 二极管 V_3 截止、 V_4 导通。在 $0 \sim \omega t_1$ 期间, 由于未加触发脉冲, V_1 处于正向阻断状态, V_2 处于反向阻断状态, 电路无电压输出, $u_o = 0$ 。

在 ωt_1 时刻, 晶闸管 V_1 的门极加上了触发脉冲 u_g , 晶闸管 V_1 被触发导通, 输出电流的路径是: $A \rightarrow V_1 \rightarrow R_L \rightarrow V_4 \rightarrow B$, 电流 i_o 自上而下流过负载 R_L , 产生有缺损的正弦波输出电压 u_o , 如图 5-17 (b) 所示。

在 $\omega t = \pi$ 时刻, 交流输入电压 u_2 过零, 使流过晶闸管 V_1 的电流降为零, 晶闸管 V_1 被关断, 致使 $i_o = 0$, 电路无电压输出, $u_o = 0$ 。

在 u_2 的负半周 (A 端为负、B 端为正), $\pi \sim \omega t_2$ 期间, 晶闸管 V_2 的阳极电位最高有可能导通 (还取决于是否触发), V_1 截止; 二极管 V_4 截止、 V_3 导通。在此期间, 由于 V_2 未加触发脉冲, V_2 处于正向阻断状态, V_1 处于反向阻断状态, 电路无电压输出, $u_o = 0$ 。

在 ωt_2 时刻, 晶闸管 V_2 的门极加上了触发脉冲 u_g , 晶闸管被触发导通, 输出电流的路径是: $B \rightarrow V_2 \rightarrow R_L \rightarrow V_3 \rightarrow A$, 电流 i_o 也是自上而下流过负载 R_L , 产生有缺损的正弦波输出电压 u_o , 如图 5-17 (b) 所示。

在 $\omega t = 2\pi$ 时刻, 交流输入电压 u_2 过零, 使流过晶闸管 V_2 的电流降为零, 晶闸管 V_2 被关断, 致使 $i_o = 0$, 电路无电压输出, $u_o = 0$ 。

由此可见, 一个周期内 V_1 、 V_4 和 V_2 、 V_3 轮流导通使负载上得到两个缺损的半波电压, 即全波电压, 波形图如图 5-17 (b) 所示。

2. 电压控制原理

由于是全波可控整流, 所以输出电压的平均值是单相可控整流电路输出电压的平均值的 2 倍, 即

$$U_o = 0.9 U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

从上式可知: 当 $\alpha = 0$ 时, $U_o = 0.9 U_2$; 当 $\alpha = \pi$ 时, $U_o = 0$ 。故输出电压 U_o 的调节范围是 $(0 \sim 0.5) U_2$ 。输出电流平均值 I_o 为

$$I_o = \frac{U_o}{R_L}$$



【本章小结】

(1) 整流电路是利用二极管的单向导电特性将交流电转换成直流电的。整流电路分半波整流和全波整流两种，其中桥式整流电路属全波整流电路。在小功率整流电路中，最常见的是单相桥式整流电路。

(2) 半波整流的电路虽然结构简单，但输出电压脉动大，直流电压 $U_0 = 0.45U_2$ 。为了克服这些缺点，目前广泛采用单相全波桥式整流电路。

(3) 与半波整流相比，由于 R_L 负载上的直流电压 U_0 是半波整流时的 2 倍，所以输出的直流电压 $U_0 = 0.9U_2$ 。

(4) 滤波电路是利用电抗元件（电容、电感）的储能作用将脉动的直流电转换为波形平滑的直流电。滤波器分为电容滤波、电感滤波和复式滤波三种。在负载电流较小的情况下，常用电容滤波器。

(5) 半波整流电容滤波电路输出直流电压 $U_0 = U_2$ ；桥式整流电容滤波电路输出的直流电压幅度也更高些， $U_0 \approx 1.2U_2$ 。

(6) 稳压电路根据负载与电压调整元件的关系分为并联型和串联型两种。硅稳压管稳压电路属于并联型稳压电路。

(7) 集成稳压器是利用半导体工艺制成的集成器件，其特点是体积小、稳定性高、性能指标好等，已逐步取代了由分立元件组成的稳压电路。三端式集成稳压器可分为三端固定式和三端可调式两大类。

(8) 晶闸管又名可控硅，它可以实现小信号控制大功率系统。可控硅的导通与阻断是通过改变其阳极与阴极和控制门极与阳极的电压大小和方向来实现的。



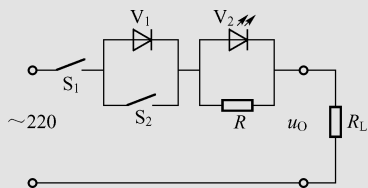
【习题五】

5.1 图题 5-1 是一个电热用具中的双控开关电路， V_2 是发光二极管，在通电时能发光，分流电阻 R 用以保护 V_2 。试问：

(1) 当开关 S_1 和 S_2 都闭合时，负载 R_L 上加的是 _____ 电压，负载 R_L 处于 _____ 状态；

(2) 当开关 S_1 闭合， S_2 断开时，负载 R_L 上加的是 _____ 电压，负载 R_L 处于 _____ 状态；

(3) 当开关 S_1 断开时，电路又处于 _____ 状态。



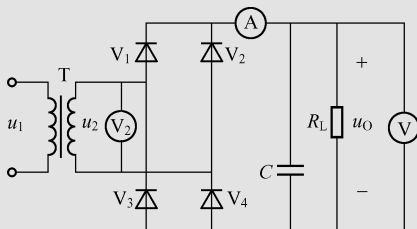
图题 5-1

5.2 在图题 5-2 所示的电路中，说明各电路的名称。若 $R_L = 100\Omega$ ，交流电压表 V_2 的读数为 20V，问直流电压表 V 和直流电流表 A 的读数为多大？并在图上标注输出电压的极性。若出现下列几种情况时，其 u_0 各为多大？

(1) 正常工作时；

(2) R_L 断开时；

- (3) C_1 断开时；
 (4) 有一个二极管因虚焊而断开时。



图题 5-2

5.3 在图题 5-2 所示的电路中，若发生以下现象，会造成什么后果？

- (1) V_1 断路；
 (2) V_2 断路；
 (3) V_1 和 V_2 接反；
 (4) 4 个二极管都接反。

5.4 直流电源中整流、滤波、稳压的目的有何不同？

5.5 有一电压为 36V ，电阻为 55Ω 的直流负载，采用单相桥式整流电路供电，试求变压器二次绕组电压和输出电流的有效值。

5.6 有两只稳压二极管 V_1 和 V_2 ，其稳压值分别为 8.5V 和 5.5V ，它们的正向压降均为 0.5V 。问使用这两只二极管能得到哪些稳定电压，画出相应的电路图（要求负载电阻有一端接“地”）。

第6章 数字电路基础知识

【主要内容】

- ☺ 数字信号与数字电路的基本概念。
- ☺ 逻辑代数的基本运算。
- ☺ 逻辑函数的表示方法及化简。
- ☺ 逻辑门电路。

【重点和难点】

- ☺ 逻辑函数的表示方法及化简。
- ☺ 集成逻辑门电路。

6.1 数字信号与数字电路的基本概念

6.1.1 数字信号与数字电路

1. 数字信号

在我们生活中，通常可以遇到许多物理量在时间和数值上都具有连续变化的特点，如温度、湿度和距离等。这种连续变化的物理量通常称为模拟量，在工程上，模拟实际物理量的电信号称为**模拟信号**，如图6-1（a）所示。相反，还有一类物理量在时间和数值上是断续变化的，它们只能在某些特定的时间内出现，如在某时刻生产某产品的个数，把这种物理量称为数字量，表示数字量的电信号称为**数字信号**，如图6-1（b）所示。

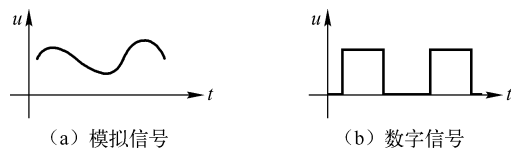


图6-1 模拟信号与数字信号

2. 数字电路

用来产生、处理、传输数字信号的电路称为数字电路。它主要研究输出信号与输入信号之间对应的逻辑关系，也就是所谓的逻辑功能。

数字电路具有以下几个主要特点。

- (1) 数字电路处理的电信号是离散的数字信号。
- (2) 数字电路中的半导体器件工作在开关状态。
- (3) 数字电路主要讨论的是输出与输入的逻辑关系。
- (4) 数字电路主要的分析、计算工具是逻辑代数。

与模拟电路相比，数字电路具有以下优点。

(1) 有利于电路的高度集成化。由于数字电路内部半导体器件工作在开关状态，电路的状态就可以用“0”和“1”表示，所以基本单元电路结构简单，功耗低，便于大规模集成和大批量生产。

(2) 抗干扰能力强，性能稳定。数字电路处理的信号是用“0”和“1”来表示信号的有无，这是很容易做到的，且不易受到干扰，从而提高了电路的稳定性。

(3) 数字信号易保存。利用储存工具可将数字信息长期保存。

(4) 保密性好。数字信息容易加密，不易被窃取。



【想一想】

数字电路为什么要采用二进制？

6.1.2 数制与码制

前面我们介绍了数字电路采用的是二进制数，数字信号是用“0”和“1”来表示信号的有无，而日常生活中和生产中人们习惯采用十进制数，要使数字电路应用于实际生活、生产中，就要进行数制间的相互转换。另外，在数字电路中要表示某一特定的对象，往往要用一定位数的二进制数来表示一定的代码。

1. 数制

数制就是进位计数的方法，在日常生活中人们习惯采用十进制数，而在数字电路中采用的是二进制数，所以这里我们只介绍十进制数和二进制数。

1) 十进制数

十进制数采用0~9，共10个数码，计数规律是“逢十进一”。通常，我们把计数码的个数称为基数，故十进制的基数是“10”。在十进制数中各位数码所处的位置不同时，其表示的数值是不同的，例如：

$$(345.231)_{10} = 3 \times 10^2 + 4 \times 10^1 + 5 \times 10^0 + 2 \times 10^{-1} + 3 \times 10^{-2} + 1 \times 10^{-3}$$

其中 10^2 、 10^1 、 10^0 、 10^{-1} 、 10^{-2} 、 10^{-3} 等都是十进制数各位的权，都是10的幂。数码与权的乘积称为加权系数。所以十进制的数值就是各位加权系数之和。

2) 二进制数

二进制数只有两个数码0和1，所以基数是2，它的计数规律是“逢二进一”，即 $0+0=0$ ， $0+1=1$ ， $1+1=10$ ， $10+1=11$ ， $11+1=100$ ，…。各位的权是2的幂，例如：

$$(1101.101)_2 = 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 0 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3}$$

3) 二进制数与十进制数相互间的转换

(1) 二进制数转换成十进制数。

二进制数转换成十进制数只要将它按权展开，再求出加权系数的和便可以得到相应的十进制数。

【例 6-1】 将二进制数 $(101.001)_2$ 转换成十进制数

解： $(101.001)_2 = 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 0 \times 2^{-1} + 0 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3}$

$= 4 + 0 + 1 + 0 + 0 + 0.125$

$= (5.125)_{10}$

(2) 十进制数转换成二进制数。

十进制数转换成二进制数需要将整数和小数分别转换，再将两部分结果合并即可得到二进制数，具体转换方法如下。

整数部分可采用“除 2 取余数，逆序排列法”，它是将整数部分逐次去除 2，依次记下余数，直到商为 0，第一个余数为最低位，最后一个为最高位。

小数部分可采用“乘 2 取整数，顺序排列法”，它是将小数部分连续乘以 2，取乘积数的整数部分，再依顺序排列得到二进制数的小数。

【例 6-2】 将十进制数 $(13.625)_{10}$ 转换成二进制数

解： 整数部分转换

2

|

13

.....

1

2

|

6

.....

0

2

|

3

.....

1

2

|

1

.....

1

0

余数

最低位

↑

读

数

顺

序

↓

最高位

因此，十进制数 $(13.625)_{10} = (1101.101)_2$

小数部分转换

0.625

×

2

1.250

.....

1

0.250

×

2

0.500

.....

0

0.500

×

2

1.000

.....

1

整数

最高位

↓

最低位

2. 码制

码制是用一定位数的二进制数来表示十进制数或字符的方法。在数字电路中常使用的是用 4 位二进制数表示 1 位十进制数的 BCD 码。1 位十进制数 0~9 共 10 个数码，可用 4 位二进制数来表示，而 4 位二进制数共有 16 种组合方式，可选用其中 10 种组合来表示 0~9。因而就有多种 BCD 码，如有 8421BCD 码、2421BCD 码、余 3 码、余 3 循环码、BCD 格雷码等。其中，最常用的是 8421BCD 码，它是一种有权码，选用了 4 位二进制数的前 10 种组合 0000~1001；后 6 个组合（1010~1111）未用。每个代码从左到右的权值分别是 8、4、2、1。十进制数与 8421BCD 码的对应关系见表 6-1。

表 6-1 十进制数与 8421BCD 码的对应关系

十进制	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
二进制	000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111	1000	1001

8421BCD 码和十进制数之间的相互转换可直接按位代换进行，例如：

• 95 •

$$(35.2)_{10} = (0011\ 0101.\ 0010)_{8421BCD} = (00110101.0010)_{8421BCD}$$

$$(1010110010000)_{8421BCD} = (0001\ 0101\ 1001\ 0000)_{8421BCD} = (1590)_{10}$$



【想一想】

什么是数制？数制电路中常用哪种数制？

6.2 逻辑代数基础

逻辑代数是分析数字电路的基本工具。利用逻辑代数可以对逻辑函数进行化简，化简后逻辑函数表达式最简，与之对应的逻辑电路的结构就简单，电路所采用的逻辑门的个数就少，降低了电路的成本，提高了逻辑门电路工作的稳定性。

6.2.1 逻辑代数的基本运算

1. 逻辑代数与逻辑变量

逻辑代数又称为开关代数，是遵循一定逻辑规律运算的代数；和普通代数一样，也用字母表示变量，称这种变量为逻辑变量，但它的取值只有0和1，这里的0和1不表示数值的大小，而表示对应的两种逻辑状态。例如，1和0可表示开关的闭合与打开、灯泡的亮与暗、晶体管的导通与截止、高电平和低电平、事件的真与假等。

2. 逻辑代数的三种基本运算

1) 与运算

在如图6-2 (a) 所示的开关串联电路中，要使灯泡Y亮，开关A和B都必须闭合，否则灯泡Y就灭；由此可见，当决定一个事情的全部条件都具备（开关A和B都闭合）时，事情才发生（灯泡Y亮），这种逻辑关系称为与逻辑。

如果用二进制数1表示开关A、B闭合状态，二进制数0表示开关A、B断开；用1表示灯泡Y亮状态，0表示灯泡Y灭；用A、B表示条件，Y就表示结果；可按如图6-2 (b) 列表，这种用“0”和“1”表示条件的组合及对应结果的表格称为真值表。

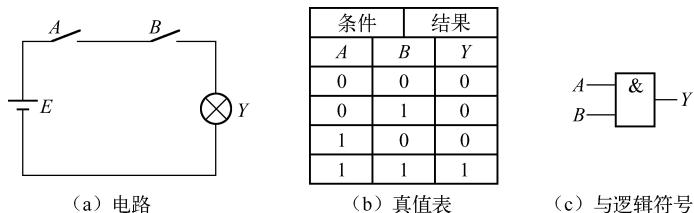


图 6-2 与逻辑

由逻辑真值表可知，变量A和B的取值和函数Y之间满足逻辑乘的关系，这种关系用逻辑函数表达式表示为

$$Y = A \cdot B$$

式中的“ \cdot ”读作与，又读作逻辑乘，通常可省略，即 $Y = AB$

逻辑乘又称为与运算，能实现与运算的电路称为与门，其逻辑符号如图 6-2 (c) 所示。

2) 或运算

在如图 6-3 (a) 所示的开关并联电路中，只要开关 A 和 B 任意一个闭合或两个同时闭合，灯 Y 泡亮；而当开关 A 、 B 均断开时，灯泡 Y 才灭。由此可见，当决定一个事情的全部条件中只要其中一个或一个以上条件得到满足，事情就发生（灯泡 Y 就亮）。这种逻辑关系称为或逻辑。和与逻辑一样，可列出或逻辑的真值表如图 6-3 (b) 所示。分析该真值表中的逻辑变量 A 、 B 的取值与函数 Y 值之间可满足逻辑加的关系，其逻辑表达式为

$$Y = A + B$$

式中的“ $+$ ”读作或，又读作逻辑加。逻辑加又称为或运算，能够实现或运算的电路称为或门。其逻辑符号如图 6-3 (c) 所示。

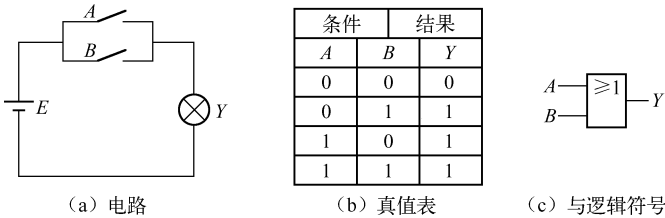


图 6-3 或逻辑

3) 非逻辑

在如图 6-4 (a) 所示的电路中，当开关 A 闭合时，灯泡 Y 灭；当开 A 断开时，灯泡 Y 就亮。由此可见，当条件不具备时，事件反而发生了，这种逻辑关系称为非逻辑关系，又称为非运算。图 6-4 (b) 是非逻辑关系的真值表；其逻辑表达式为

$$Y = \bar{A}$$

式中符号“ $-$ ”读作非，读作 A 的非或 A 的反，非逻辑符号如图 6-4 (c) 所示。

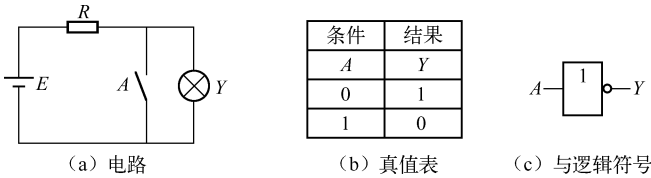


图 6-4 非逻辑

3. 复合逻辑运算

在实际逻辑运算中，往往都是有“与”、“或”、“非”三种基本逻辑运算组合而成的复合逻辑运算，下面是几种常用的复合逻辑运算。

1) 与非运算

从图 6-5 (a) 可以看出，该逻辑运算是 A 、 B 先进行与运算再进行非运算。图 6-5 (b) 是简化的与非逻辑符号，其逻辑表达式为

$$Y = \overline{AB}$$

2) 或非运算

从图 6-6 (a) 可以看出, 该逻辑运算是 A 、 B 先进行或运算再进行非运算。图 6-6 (b) 是简化的或非逻辑符号, 其逻辑表达式为

$$Y = \overline{A + B}$$



图 6-5 与非逻辑

图 6-6 或非逻辑

3) 与或非运算

从图 6-7 (a) 可以看出, 该逻辑运算是 A 、 B 和 C 、 D 先同步进行与运算, 然后将与运算的结果 AB 、 CD 进行或运算, 再将或的结果进行非运算, 最后得运算结果。图 6-7 (b) 是简化的与或非逻辑符号, 其逻辑表达式为

$$Y = \overline{AB + CD}$$

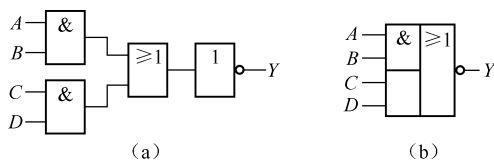


图 6-7 与或非逻辑

6.2.2 逻辑函数及表示方法

1. 逻辑函数

从前面所述的几种逻辑关系中可以知道, 把条件 (输入逻辑变量) 看作自变量, 结果视为因变量 (输出逻辑变量); 只要输入逻辑变量的值确定之后, 输出逻辑变量的值也就确定了; 所以输入逻辑变量与输出逻辑变量之间是一种对应的逻辑关系, 这种逻辑关系就成为逻辑函数。一般表达式可表示为

$$Y = F(A, B, C, \dots)$$

式中, A 、 B 、 C 称作输入逻辑变量; Y 是变量 A 、 B 、 C 的函数, 也称输出逻辑变量; F 表示逻辑关系。

2. 逻辑函数的表示方法及相互转换

逻辑函数常用的表示方法有: 表达式、真值表、逻辑图。这三种表示方法在分析和设计数字电路时经常要相互转换。

1) 逻辑函数表达式

用与、或、非三种基本运算来表示输入逻辑变量和输出逻辑变量对应关系的代数式称为逻辑函数表达式。例如:

$$Y = \overline{AB} + \overline{AB}$$

2) 真值表

真值表是输入逻辑表变量的各种可能取值的组合和输出函数值排列成的表格。 n 个输入逻辑变量就有 2^n 个不同的取值组合。由表达式列真值表时，只要将输入逻辑变量所取值组合代入表达式进行运算，再把相应函数值填入表格可得真值表。例如， $\bar{Y} = \bar{A}B + AB$ 的真值表见表 6-2。

由真值表转换成表达式时，要找出真值表中函数值为 1 的输入组合，输入变量值为 1 的写成原变量，为 0 的写成反变量，再把各变量相与，然后将各个与项相加，即可得逻辑函数表达式。例如，将表 6-3 转换成逻辑函数表达式。

表 6-2

输入变量		函数值
A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

表 6-3

输入变量		函数值
A	B	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

所以，有

$$Y = \bar{A}\bar{B} + AB$$

3) 逻辑图

逻辑图用逻辑符号及连接导线表示逻辑函数的电路图，如图 6-8 所示。逻辑图与逻辑函数表达式可以相互转换。

由逻辑图写表达式可根据逻辑门的连接方式和每个逻辑门功能写出，如图 6-8 所示的逻辑图，可从输入向输出推写出 $Y = AB + \bar{A}C$ 。当然也可以从输出向输入推写。

由表达式转换成逻辑图时，可用式中运算用的逻辑符号表示完成。例如， $Y = \bar{A}B + \bar{B}C$ 中 \bar{A} 、 \bar{B} 都是非运算，就用非门实现； $\bar{A}B$ 、 $\bar{B}C$ 都是与运算，就用与门实现； $\bar{A}B$ 和 $\bar{B}C$ 进行或运算，就用或门实现，因此 Y 的逻辑图如图 6-9 所示。

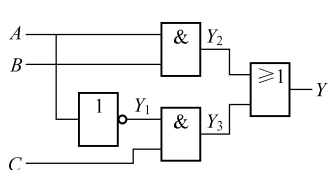


图 6-8

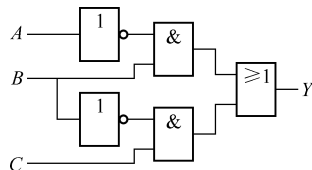


图 6-9

6.2.3 逻辑代数的基本定律及逻辑函数的化简

1. 逻辑代数的基本定律与公式

逻辑代数的基本定律是用逻辑表达式来描写逻辑运算的一些基本规律，是化简逻辑函数

和分析、设计逻辑电路的基础。逻辑代数的基本定律见表 6-4。

表 6-4 逻辑代数的基本定律

序 号	定 律 名 称	逻辑代数表达式
1	0-1 律	① $A+1=1$ ② $A\cdot 0=0$
2	自等律	① $A+0=A$ ② $A\cdot 1=A$
3	重叠律	① $A+A=A$ ② $A\cdot A=A$
4	互补律	① $A+\bar{A}=1$ ② $A\cdot \bar{A}=0$
5	非非律	① $\bar{\bar{A}}=A$
6	交换律	① $A+B=B+A$ ② $A\cdot B=B\cdot A$
7	结合律	① $(A+B)+C=A+(B+C)$ ② $(A\cdot B)\cdot C=A\cdot (B\cdot C)$
8	分配律	① $A+B\cdot C=(A+B)(A+C)$ ② $A\cdot (B+C)=AB+AC$
9	反演律(摩根定律)	① $\overline{A+B}=\bar{A}\cdot \bar{B}$ ② $\overline{AB}=\bar{A}+\bar{B}$
10	扩展律	① $A=A(B+\bar{B})=AB+\bar{A}B$ ② $A=AB+\bar{A}B$
11	吸收律	① $A+AB=A$ ② $A(A+B)=A$ ③ $A+\bar{A}B=A+B$
12	冗余律	① $AB+\bar{A}C+BC=AB+\bar{A}C$

2. 逻辑函数的公式法化简

逻辑函数的化简通常有公式法和卡诺图法，在这里我们只介绍公式法化简逻辑函数。所谓化简，就是将逻辑表达式化为最简单的表达式。在各种逻辑函数表达式中，与或表达式最常用。最简与或表达式的标准是：

- ✎表达式中所含与项个数最少；
- ✎每个与项中的变量个数最少。

公式法化简是利用基本定律、常用公式对逻辑函数进行化简。下面是介绍几种常用的化简方法。

(1) 并项法。

利用公式： $A+\bar{A}=1$ ， $AB+\bar{A}B=A$ ，将两项合为一项，并消去一个变量。例如：

$$A\bar{B}C+\bar{A}BC=AB(C+\bar{C})=AB$$

(2) 吸收法。

利用公式 $A+AB=A$ 将多余吸收。例如：

$$\bar{A}B+\bar{A}BCD=\bar{A}B$$

(3) 消除法。

利用公式 $A+\bar{A}B=A+B$ 消除多余因子。例如：

$$AB+\bar{A}C+\bar{B}C=AB+(\bar{A}+\bar{B})C=AB+\bar{A}\bar{B}C=AB+C$$

(4) 配项法。

在适当项中，配上 $A+\bar{A}=1$ 的关系式，同其他项的因子进行化简。例如：

$$\begin{aligned}
 \overline{AB} + \overline{BC} + \overline{BC} + \overline{AB} &= \overline{AB} + \overline{BC}(A + \overline{A}) + \overline{AB}(C + \overline{C}) \\
 &= \overline{AB} + \overline{ABC} + \overline{BC} + \overline{ABC} + \overline{ABC} + \overline{ABC} \\
 &= \overline{AB} + \overline{BC} + \overline{AC}
 \end{aligned}$$

在实际化简时应综合上述几种方法，灵活应用进行化简。

【例 6-3】 化简 $Y = AB + \overline{AB} + \overline{A}B + \overline{A}\overline{B}$ 。

$$\begin{aligned}
 \text{解：} Y &= AB + \overline{AB} + \overline{A}B + \overline{A}\overline{B} \\
 &= A(B + \overline{B}) + \overline{A}(B + \overline{B}) \\
 &= A + \overline{A} \\
 &= 1
 \end{aligned}$$

【例 6-4】 化简 $Y = \overline{A} + AB + ADE$ 。

$$\begin{aligned}
 \text{解：} Y &= \overline{A} + AB + ADE \\
 &= \overline{A} + A(B + DE) \\
 &= \overline{A} + B + DE
 \end{aligned}$$

【例 6-5】 化简 $Y = AB + \overline{A}\overline{C} + \overline{B}\overline{C}$ 。

$$\begin{aligned}
 \text{解：} Y &= AB + \overline{A}\overline{C} + \overline{B}\overline{C} \\
 &= AB + \overline{A}\overline{C} + (A + \overline{A})\overline{B}\overline{C} \\
 &= AB + \overline{A}\overline{C} + \overline{A}\overline{B}\overline{C} + A\overline{B}\overline{C} \\
 &= (AB + \overline{A}\overline{B}\overline{C}) + (\overline{A}\overline{C} + A\overline{B}\overline{C}) \\
 &= AB + \overline{A}\overline{C}
 \end{aligned}$$

6.3 逻辑门电路

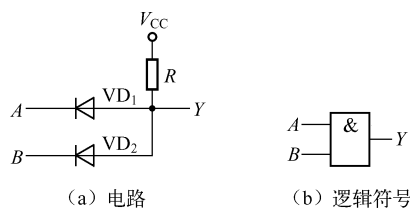
在上一节中，我们介绍了三种基本逻辑运算和几种常用的复合逻辑运算。在数字电路中用来实现这些逻辑运算的电路称为逻辑门电路，简称门电路。它是构成数字电路的基本单元，可以用二极管、三极管等分立元件组成，也可以制作成相应的集成门电路。

逻辑运算中的逻辑变量 1 和 0，在数字电路中是用高、低电平来表示的。用高电平表示 1，用低电平表示 0 的情况称为正逻辑，反之称为负逻辑。本书均采用正逻辑。

6.3.1 分立元件门电路

1. 与门电路

如图 6-10 (a) 所示为二输入端的与门电路，由二极管、电阻构成；图 6-10 (b) 是它



(a) 电路

(b) 逻辑符号

图 6-10 二极管与门电路

的逻辑符号。 A 、 B 是两输入端， Y 是输出端，设 $V_{CC} = 5\text{V}$ ，输入高电平 $U_{\text{IH}} = 3\text{V}$ ，输入低电平 $U_{\text{IL}} = 0\text{V}$ ，二极管正向导通电压 $U_{\text{D}} = 0.7\text{V}$ ，下面分析它的逻辑功能。

(1) 当输入 $A = B = 0\text{V}$ (A 、 B 都为低电平) 时二极管 VD_1 、 VD_2 都导通，输出 $Y = 0.7\text{V}$ ，为低电平。

(2) 当输入 $A = 0\text{V}$ (低电平)， $B = 3\text{V}$ (高电平) 时， VD_1 优先导通使 VD_2 反偏截止，输出 $Y = 0.7\text{V}$ ，为低电平。

(3) 当输入 $A = 3\text{V}$ (高电平)， $B = 0\text{V}$ (低电平) 时， VD_2 优先导通使 VD_1 反偏截止，输出 $Y = 0.7\text{V}$ ，为低电平。

(4) 当输入 $A = B = 3\text{V}$ (A 、 B 都为高电平) 时二极管 VD_1 、 VD_2 仍然都导通，输出 $Y = 3.7\text{V}$ ，为高电平。

若用 1 表示高电平，0 表示低电平，可列出图 6-10 所示电路的电平真值表后，转换成逻辑真值表，见表 6-5 和表 6-6。

表 6-5 与门电平真值表

输 入		输 出
A (V)	B (V)	Y (V)
0	0	0.7
0	3	0.7
3	0	0.7
3	3	3.7

表 6-6 与门逻辑真值表

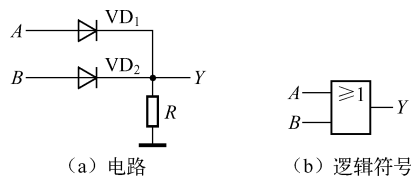
输 入		输 出
A	B	Y
0	0	0
0	3	0
3	0	0
3	3	1

由与门的真值表可以看出与门的逻辑功能为“有 0 出 0，全 1 出 1”，其表达式为

$$Y = AB$$

2. 或门电路

图 6-11 (a) 为二输入端的或门电路，也是由二极管、电阻构成。图 6-11 (b) 是它的逻辑符号。图 6-11 中， A 、 B 为输入变量， Y 是输出变量；当输入 A 、 B 有一个为 3V (高电平) 时，输出 Y 为 2.3V (高电平)；只有当输入 A 、 B 都为 0V (低电平) 时，其输出 Y 才为 0V (低电平)。因此同理可列出或门电路的电平真值表和逻辑真值表，见表 6-7 和表 6-8。



(a) 电路

(b) 逻辑符号

图 6-11 二极管或门电路

表 6-7 或门电平真值表

输 入		输 出
A (V)	B (V)	Y (V)
0	0	0
0	3	2.3
3	0	2.3
3	3	2.3

表 6-8 或门逻辑真值表

输 入		输 出
A	B	Y
0	0	0
0	3	1
3	0	1
3	3	1

由或门的真值表可以看出，或门的逻辑功能为“有 1 出 1，全 0 出 0”，其表达式为：

$$Y = A + B$$

3. 非门电路

图 6-12 (a) 为非门电路，由三极管、电阻构成。图 6-12 (b) 是它的逻辑符号。合理设置电路的参数，就可以使三极管 V 工作在开关状态。当输入 A 为低电平 (0) 时，三极管 $U = 0V$ ，故处于截止状态，输出 $Y = V_{CC}$ ，为高电平 (1)；当输入 A 为高电平 (1) 时，三极管 V 饱和导通，输出 $Y = V_{CES} \approx 0.3V$ ，为低电平 (0)，其真值表见表 6-9。

表 6-9 非门逻辑真值表

输 入	输 出
A	Y
0	1
1	0

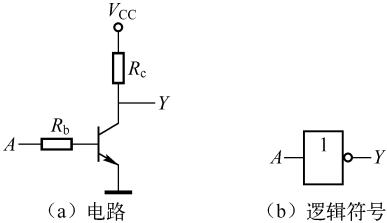


图 6-12 三极管非门电路

由非门的真值表可以看出，非门的逻辑功能为“有 0 出 1，有 1 出 0”，其表达式为

$$Y = \overline{A}$$

6.3.2 集成 TTL 门电路

集成 TTL 门电路的输入端至输出端均采用三极管，故又称为晶体管逻辑门电路。

1. TTL 与非门电路

TTL 与非门典型电路如图 6-13 (a) 所示，图 6-13 (c) 是它的逻辑符号。TTL 与非门典型电路由以下三部分组成。

(1) 输入级：由多发射极三极管 V_1 和电阻 R_1 组成，其等效电路如图 6-13 (b) 所示，它相当于一个与门电路，所以在输入级就可以实现与逻辑功能。

(2) 倒相级：由 V_2 、 R_2 和 R_3 组成，从 V_2 的集电极和发射极同时输出两个逻辑电平相

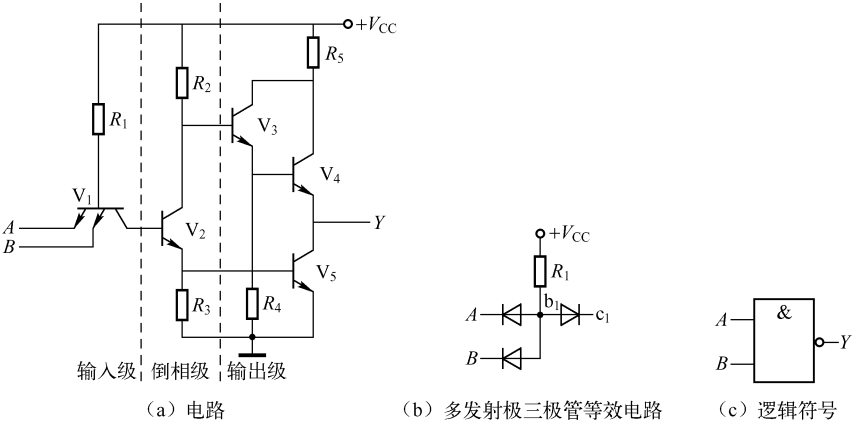


图 6-13 TTL 与非门典型电路

反的信号去控制输出管 V_4 、 V_5 工作在截然相反的工作状态。

(3) 输出级：由 V_3 、 V_4 、 V_5 、 R_4 、 R_5 构成的推拉式输出结构。

TTL 与非门电路的工作原理如下。

(1) 当输入端 A 、 B 至少有一个为低电平 U 时， V_1 饱和导通， V_2 、 V_5 都截止，导致 V_3 、 V_4 饱和导通，输出 Y 为高电平 U 。

(2) 当输入端 A 、 B 全部为高电平 U 时， V_1 倒置（反向导通）向 V_2 提供基极电流，使得 V_2 、 V_5 饱和导通，此时 V_2 的集电极电位 $V \approx 1V$ ，可使 V_3 导通，但不足以使 V_4 导通，故 V_4 截止，输出 Y 为低电平 U 。

综上所述：可知 TTL 与非门的输入与输出间的逻辑关系为 $Y = \overline{AB}$ 。

2. 其他功能的 TTL 与非门电路

1) 集电极开路的与非门（又称为 OC 门）

在实际应用中往往要将几个与非门的输出端连在一起使用，来实现具体的一些功能。但前面介绍的 TTL 与非门不允许输出端直接连接，否则会因电流过大而烧坏门电路。为解决此问题，可采用下面介绍的集电极开路的与非门。

集电极开路的与非门电路如图 6-14 (a) 所示，图 6-14 (b) 是它的逻辑符号。从电路图来看，和图 6-13 (a) 相比，OC 门少了 V_3 、 V_4 、 R_4 、 R_5 ，所以 OC 门的工作原理读者可以参照普通 TTL 与非门的原理自行分析。但要注意，由于 V_5 的集电极开路，在使用 OC 门的时候，须在输出端与电源之间接一电阻 R_L ，如图 6-14 (a) 中虚线部分，此电阻又称为上拉电阻。

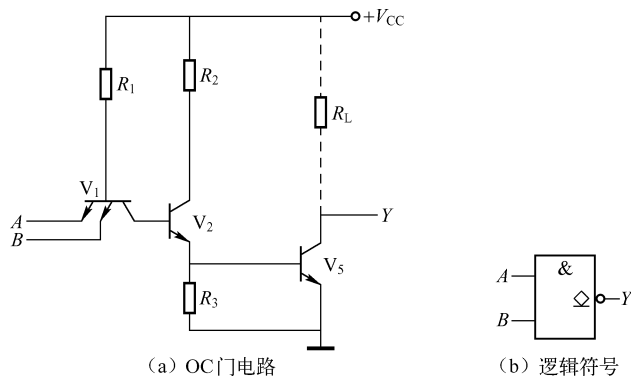


图 6-14 集电极开路的与非门电路

2) 三态输出门（又称为 TS 门或 3S 门）

前面所介绍的门电路输出只有 0 和 1 两种状态，属低阻输出。而三态门不仅可以输出 0 和 1 两种状态，还可以输出第三种状态：高阻态 Z ，此状态输出端相当于开路。三态输出门电路如图 6-15 (a) 所示，图 6-15 (b) 是它的逻辑符号。

由图 6-15 (a) 可知，此电路是在普通 TTL 与非门的基础上，在 V_1 的发射级和 V_3 的基级多接了个二极管 VD ， V_1 的一个发射级作为控制端 EN ，当 $EN = 1$ （高电平）时， VD 截止，对电路无影响，实现与非功能 $Y = \overline{AB}$ ；当 $EN = 0$ （低电平）时，二极管 VD 导通，这

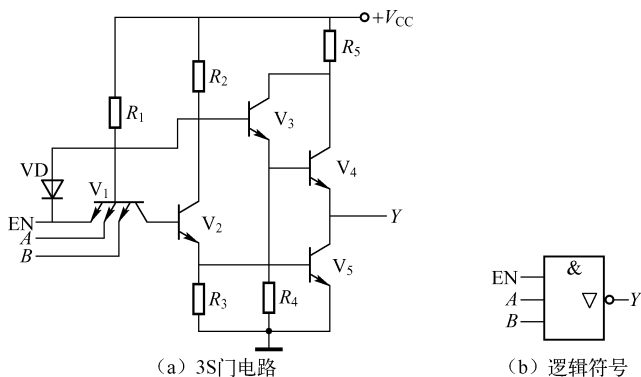


图 6-15 三态输出门电路

样就使得三极管 V_3 、 V_4 、 V_5 都截止，所以此时从输出端看电路是高阻状态。可见 $EN = 0$ 时为高组态； $EN = 1$ 时实现与非功能。

6.3.3 使用 TTL 门电路应注意的事项

1. 滤除电源的干扰

由于工作电源的通断或其他因素，在电源线上产生干扰脉冲，可以在电路板上的 V_{CC} 进线处对地并接一个 $10 \sim 50\mu\text{F}$ 的电容器；在电路板上每隔 5 块集成电路，加接一个 $0.01 \sim 0.1\mu\text{F}$ 的高频电容，以滤除干扰脉冲。

另外，电源 V_{CC} 和地线不能接反，否则将损坏电路。

2. 不用输入端的处理

在具体使用时，一般不要让多余的输入端悬空，以防止干扰信号侵入，产生不必要的错误运算。与门、与非门可将未用的输入端通过一个 $1 \sim 10\text{k}\Omega$ 的电阻接电源 V_{CC} ；或门、或非门可将不用的输入端接地。

3. 输入端不允许直接接地

4. 安装和焊接工艺

- (1) 连接要尽量短。
- (2) 整体接地要良好，地线要粗、短；电源地和信号地要分开。
- (3) 焊接工具（电烙铁）最好在 35W 以下。



【想一想】

- (1) 在逻辑电路中，正、负逻辑是怎样规定的？
- (2) 试说明 OC 门的逻辑功能？它有什么特点和用途？
- (3) 试说明三态输出门的逻辑功能？它有什么特点和用途？
- (4) 使用集成 TTL 门电路时应注意哪些问题？



【本章小结】

(1) 在数字电路中常用二进制数 0 和 1 表示电路的两种不同状态，还常用 8421BCD 码来表示十进制数。

(2) 逻辑代数是分析数字逻辑电路的工具，利用逻辑代数可以把实际的逻辑问题用数学表达式描述，方便进行电路分析和设计。

(3) 逻辑函数有三种表示方法，且相互可以转换。

(4) 利用逻辑代数的基本定律和公式可对逻辑函数进行化简，逻辑函数越简单，与之对应的逻辑电路就简单。

(5) 逻辑门电路是构成数字电路的单元，分立元件门电路和集成 TTL 门电路，主要要掌握 TTL 门电路的应用和正确使用方法。



【习题六】

6.1 完成下列十进制数与二进制数的相互转换。

(1) $(16)_{10} = (\quad)_{2}$

(2) $(10.25)_{10} = (\quad)_{2}$

(3) $(10010)_{2} = (\quad)_{10}$

(4) $(1011.110)_{2} = (\quad)_{10}$

6.2 完成下列十进制数与 8421BCD 码的相互转换。

(1) $(14)_{10} = (\quad)_{8421BCD}$

(2) $(256.49)_{10} = (\quad)_{8421BCD}$

(3) $(0001001110010101)_{8421BCD} = (\quad)_{10}$

(4) $(101111000.001010)_{8421BCD} = (\quad)_{10}$

6.3 用公式法化简下列函数。

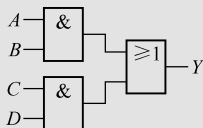
(1) $Y = \overline{A}B + AC + \overline{B}C$

(2) $Y = \overline{ABCD} = A + B + C + D$

(3) $Y = \overline{AC} + \overline{ABC} = ABC$

(4) $Y = AB + AC + \overline{AB} + \overline{BC}$

6.4 已知逻辑图如图题 6-1 所示，写出其逻辑表达式，并列出真值表。



图题 6-1

6.5 列出下述问题的真值表，并写出其表达式和画出逻辑图。设 A、B、C 三个输入信号，如果三个输入信号均为 0 或其中一个信号为 1，则输出为 1；其他情况下 Y=0。

第7章 组合逻辑电路

【主要内容】

- ☺ 组合逻辑电路的分析方法。
- ☺ 组合逻辑电路的设计步骤。
- ☺ 加法器、编码器及译码器。

【重点和难点】

- ☺ 组合逻辑电路的设计步骤。
- ☺ 加法器、编码器及译码器的分析。

7.1 组合逻辑电路的基础知识

7.1.1 组合逻辑电路的特点及逻辑功能的表示方法

按照逻辑功能的不同特点，将数字电路分为两类，一类是组合逻辑电路（简称组合电路），一类是时序逻辑电路（简称时序电路）。

1. 组合电路的特点

组合电路的特点是：任何时刻的输出状态仅取决于该时刻电路的输入信号，而与电路原来的状态无关。

2. 组合电路逻辑功能的表示方法

组合电路逻辑功能的表示方法有：逻辑函数表达式、真值表、逻辑电路图、波形图及卡诺图。

7.1.2 组合逻辑电路的分析与设计

1. 组合电路的分析方法

所谓分析一个给定的逻辑电路，就是要分析找出电路的逻辑功能来。组合电路的分析方法可按下列步骤进行。

- (1) 根据逻辑电路写出表达式，由输入到输出逐级推出输出表达式。
- (2) 化简。用代数法或卡诺图将所得的逻辑函数表达式化为最简式或做适当变换。

- (3) 由化简后的表达式，写出真值表。
 (4) 由真值表或最简式，确定该电路的逻辑功能。

【例 7-1】 组合电路的逻辑图如图 7-1 所示，请分析该电路的逻辑功能。

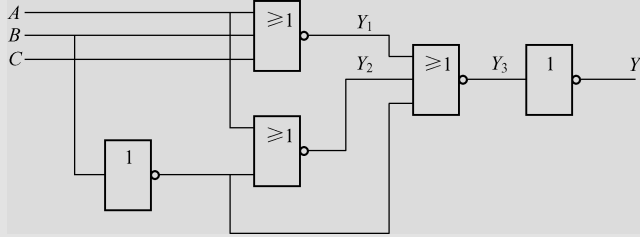


图 7-1 组合电路的逻辑图

解：(1) 逐级写出输出表达式。

$$Y_1 = A + B + C, \quad Y_2 = A + \overline{B} \quad Y_3 = Y_1 + Y_2 + \overline{B},$$

$$\begin{aligned} Y = \overline{Y_3} &= \overline{Y_1 + Y_2 + \overline{B}} = \overline{Y_1 + Y_2} + B \\ &= \overline{A + B + C} + \overline{A + \overline{B}} + B \end{aligned}$$

(2) 化简。

$$\begin{aligned} Y &= \overline{A + B + C} + \overline{A + \overline{B}} + B = \overline{A} \overline{B} \overline{C} + \overline{A} B + B \\ &= \overline{A} B + (\overline{A} \overline{B} \overline{C} + B) = \overline{A} B + B(\overline{A} \overline{C} + 1) = \overline{A} B + B = \overline{A} + B \end{aligned}$$

(3) 写出真值表。

根据化简的表达式写出真值表 7-1。

表 7-1 例 7-1 的真值表

输 入			输 出
A	B	C	Y
0	0	0	1
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	0

(4) 描述电路的逻辑功能。

从真值表中可以看出，电路的输出 Y 只与输入 A、B 有关，而与输入 C 无关。Y 和 A、B 的逻辑关系为：A、B 中只要一个为 0，Y=1；A、B 全为 1 时，Y=0。所以，Y 和 A、B 的逻辑关系为与非运算的关系。

2. 组合逻辑电路的设计步骤

根据给出的实际逻辑问题，求出实现这一逻辑功能的最简单逻辑电路，这就是设计组合逻辑电路时要完成的工作。

组合逻辑电路的设计可按以下步骤进行。

(1) 根据实际问题的逻辑关系，列出相应的真值表。注意在定义逻辑状态的时候是由你自己来定 0、1 两种状态分别代表输入变量和输出变量的两种不同状态。

(2) 由真值表写出逻辑函数表达式。

(3) 化简逻辑表达式。

(4) 根据化简得到的最简式，画出逻辑电路图。

下面举一个具体实例来说明组合逻辑电路设计思路。

【例 7-2】 设计一个楼梯开关的控制逻辑电路，以控制楼梯灯，使之在上楼前，用楼下开关打开电灯，上楼后，用楼上开关关灭电灯。或者在下楼前，用楼上的开关打开电灯，下楼后，再用楼下开关关灭电灯。

解：(1) 由逻辑要求列出真值表。假设楼上开关为 A ，楼下开关为 B ，灯泡为 Y 。并假设 A 、 B 闭合时为 1，断开为 0，灯泡 $Y=1$ 表示灯亮， $Y=0$ 表示灯灭。根据逻辑要求列出真值表 7-2。

表 7-2 例 7-2 的真值表

输 入		输 出
A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

(2) 由表 7-2 可直接写出逻辑表达式。

$$Y = A \bar{B} + \bar{A} B = A \oplus B$$

(3) 化简。此式已为最简式。

(4) 由逻辑函数表达式 Y ，画出逻辑图电路，如图 7-2 所示。在实际应用中，可以应用两个单刀双掷开关来实现这一功能，如图 7-3 所示。

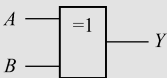


图 7-2 逻辑图

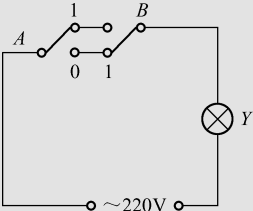


图 7-3 实际电路



【想一想】

- (1) 组合逻辑电路的特点是什么？
- (2) 组合逻辑电路的表示方法有哪些？
- (3) 如何分析组合逻辑电路？

7.2 加法器

两个二进制数之间的算术运算，目前在计算机中都化作若干加法进行运算。因此，加法器是构成算术运算的基本单元。

7.2.1 半加器

1. 定义

半加器是一种不考虑低位来的进位数，只考虑本位数的两个 1 位二进制数求和的逻辑电路。

2. 真值表

设 A_n 、 B_n 为两个 1 位二进制数， S_n 为本位和数， C_n 是向高位的进位，根据二进制加法运算规则可列出半加器的真值表，见表 7-3。

表 7-3 半加器的真值表

输 入		输 出	
被加数 A_n	加数 B_n	和 S_n	进位数 C_n
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

3. 表达式

$$S_n = \overline{A_n}B_n + A_n\overline{B_n} = A_n \oplus B_n$$

$$C_n = A_n + B_n$$

4. 逻辑图

从表达式可以看出，半加器由一个异或门和一个与门组成，其逻辑图和符号如图 7-4 所示。

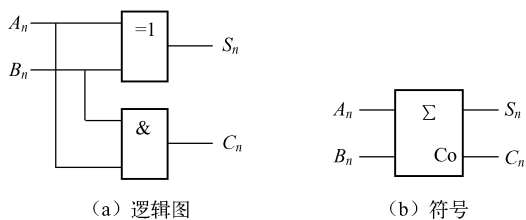


图 7-4 半加器

7.2.2 全加器

1. 定义

全加器是能对两个 1 位二进制数进行相加并考虑低位来的进位，即相当于 3 个 1 位二进制数相加，求得和及进位的逻辑电路称为全加器。所以它有 3 个输入端： A_n 、 B_n 、 C_{n-1} ；两个输出端：本位和 S_n 、向高位进位数 C_n 。

2. 真值表

同样根据二进制加法运算规则可列出全加器的真值表，见表 7-4。

表 7-4 全加器的真值表

输 入			输 出	
A_n	B_n	C_{n-1}	S_n	C_n
0	0	0	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	0	1
1	1	0	0	1
1	1	1	1	1

3. 表达式

根据真值表可直接写出 S_n 和 C_n 的逻辑表达式：

$$\begin{aligned}
 S_n &= \bar{A}_n \bar{B}_n C_{n-1} + \bar{A}_n B_n \bar{C}_{n-1} + A_n \bar{B}_n \bar{C}_{n-1} + A_n B_n \\
 &= \bar{A}_n (\bar{B}_n C_{n-1} + B_n \bar{C}_{n-1}) + A_n (\bar{B}_n \bar{C}_{n-1} + B_n) \\
 &= \bar{A}_n (B_n \oplus C_{n-1}) + A_n (\overline{B_n \oplus C_{n-1}}) \\
 &= A_n \oplus B_n \oplus C_{n-1} \\
 C_n &= A_n B_n C_{n-1} + A_n B_n \bar{C}_{n-1} + A_n \bar{B}_n B_n
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= (A_n B_n + A_n B_n) C_{n-1} + A_n B_n \\
 &= (A_n \oplus B_n) C_{n-1} + A_n B_n
 \end{aligned}$$

4. 逻辑图

根据 S_n 和 C_n 的逻辑表达式，可画出全加器逻辑图和符号，如图 7-5 所示。

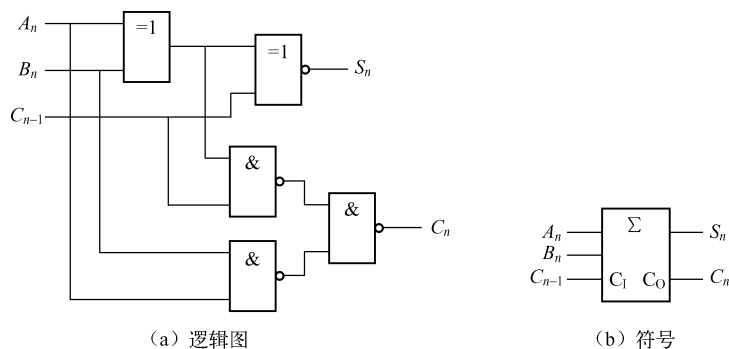


图 7-5 全加器



【想一想】

- (1) 全加器与半加器两者有何不同？有何联系？
- (2) 仿照全加器的设计思路，设计一个二进制 1 位全减器。假设 A_n 为被减数， B_n 为减数， J_n 为高位来的借位， Z_n 为输出（差值）。

7.3 编码器

所谓编码，就是将符号或数码按规律编排，使其代表某种特定的含义。例如，学校给每个班级编排的班级代号，电信局分给每个用户的电话号码等。而在数字电路中，将若干个 0、1 按一定的规律编排在一起，编成不同代码，并将这些代码赋予特定含义，这就是某种二进制编码。

在编码过程中，要注意确定二进制代码的位数。一般 n 位二进制有 2^n 个状态，可表示 2^n 种特定含义。例如，1 位二进制数只有 0、1 两种状态；2 位二进制数有 00、01、10、11 四个状态。根据被编码信号的不同特点和要求，编码器可分为普通编码器（任何时刻只允许一个输入编码信号，否则输出发生混乱）和优先编码器（允许几个信号同时输入，但电路只对其中优先级别最高的信号进行编码），而每类又可分为二进制编码器和二—十进制编码器。

7.3.1 二进制编码器

用 n 位二进制代码对 2^n 个型号进行编码的电路称为二进制编码器。图 7-6 是 3 位二进制编码示意图，根据二进制编码器的要求可得出编码器的真值表，见表 7-5。

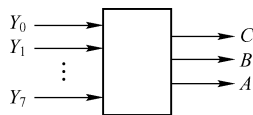


图 7-6 3 位二进制编码示意图

表 7-5 二进制编码器的真值表

十进制数	输入	输出		
		A	B	C
0	Y_0	0	0	0
1	Y_1	0	0	1
2	Y_2	0	1	0
3	Y_3	0	1	1
4	Y_4	1	0	0
5	Y_5	1	0	1
6	Y_6	1	1	0
7	Y_7	1	1	1

从真值表可以列出其逻辑表达式：

$$A = Y_4 + Y_5 + Y_6 + Y_7 = \overline{Y_4} \overline{Y_5} \overline{Y_6} \overline{Y_7}$$

$$B = Y_2 + Y_3 + Y_6 + Y_7 = \overline{Y_2} \overline{Y_3} \overline{Y_6} \overline{Y_7}$$

$$C = Y_1 + Y_3 + Y_5 + Y_7 = \overline{Y_1} \overline{Y_3} \overline{Y_5} \overline{Y_7}$$

同样可直接画出逻辑图，如图 7-7 所示。

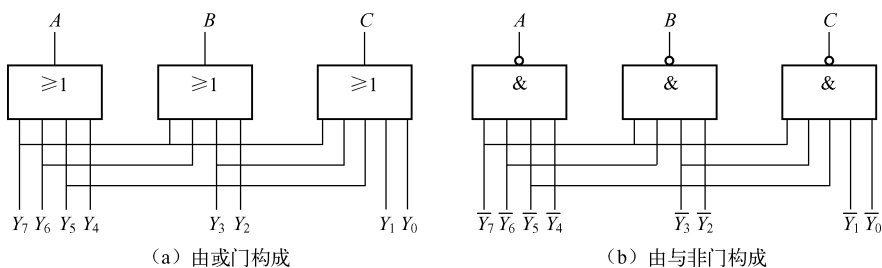


图 7-7 3 位二进制编码器逻辑图

7.3.2 二进制优先编码器

目前，最常用的集成 3 位二进制（8 线—3 线）优先编码器主要有 74LS148。74LS148 的真值表见表 7-6（输入低电平有效）。74LS148 的引脚排列和逻辑功能如图 7-8 所示。

表 7-6 74LS148 的真值表

输入									输出				
\overline{ST}	$\overline{I_7}$	$\overline{I_6}$	$\overline{I_5}$	$\overline{I_4}$	$\overline{I_3}$	$\overline{I_2}$	$\overline{I_1}$	$\overline{I_0}$	$\overline{Y_2}$	$\overline{Y_1}$	$\overline{Y_0}$	$\overline{Y_{EX}}$	$\overline{Y_S}$
1	x	x	x	x	x	x	x	x	1	1	1	1	1

续表

输 入									输 出				
$\overline{\text{ST}}$	$\overline{I_7}$	$\overline{I_6}$	$\overline{I_5}$	$\overline{I_4}$	$\overline{I_3}$	$\overline{I_2}$	$\overline{I_1}$	$\overline{I_0}$	$\overline{Y_2}$	$\overline{Y_1}$	$\overline{Y_0}$	$\overline{Y_{\text{EX}}}$	$\overline{Y_{\text{S}}}$
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
0	0	×	×	×	×	×	×	×	0	0	0	0	1
0	1	0	×	×	×	×	×	×	0	0	1	0	1
0	1	1	0	×	×	×	×	×	0	1	0	0	1
0	1	1	1	0	×	×	×	×	0	1	1	0	1
0	1	1	1	1	0	×	×	×	1	0	0	0	1
0	1	1	1	1	1	0	×	×	1	0	1	0	1
0	1	1	1	1	1	1	0	×	1	1	0	0	1
0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1

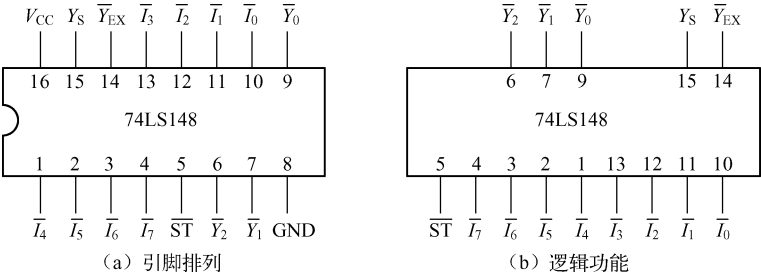


图 7-8 74LS148 引脚排列和逻辑功能

其中： $\overline{\text{ST}}$ 为使能输入端，低电平有效。 $\overline{Y_{\text{S}}}$ 为使能输出端，通常接至低位芯片的输出端。 $\overline{Y_{\text{S}}}$ 和 $\overline{\text{ST}}$ 配合可以实现多级编码器之间的优先级别的控制。 $\overline{Y_{\text{EX}}}$ 为扩展输出端，是控制标志。 $\overline{Y_{\text{EX}}} = 0$ 表示是编码输出； $\overline{Y_{\text{EX}}} = 1$ 表示不是编码输出。

7.3.3 二—十进制编码器

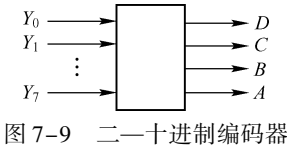


图 7-9 二—十进制编码器

将十进制数的 10 个 0~9 编成二进制代码的电路称为二—十进制编码器。要对 10 个信号进行编码至少需要 4 位二进制数，所以它的输出信号为 4 位，因此这种编码器也称为 10 线—4 线编码器。二—十进制编码器如图 7-9 所示，二—十进制编码器的真值表见表 7-7。

表 7-7 二—十进制编码器的真值表

输入	输出			
Y	A	B	C	D
0 (Y_0)	0	0	0	0
1 (Y_1)	0	0	0	1
2 (Y_2)	0	0	1	0

续表

输入 Y	输出			
	A	B	C	D
3 (Y_3)	0	0	1	1
4 (Y_4)	0	1	0	0
5 (Y_5)	0	1	0	1
6 (Y_6)	0	1	1	0
7 (Y_7)	0	1	1	1
8 (Y_8)	1	0	0	0
9 (Y_9)	1	0	0	1

从真值表可以列出其逻辑表达式：

$$A = Y_8 + Y_9 = \overline{Y_8} \overline{Y_9}$$

$$B = Y_4 + Y_5 + Y_6 + Y_7 = \overline{Y_4} \overline{Y_5} \overline{Y_6} \overline{Y_7}$$

$$C = Y_2 + Y_3 + Y_6 + Y_7 = \overline{Y_2} \overline{Y_3} \overline{Y_6} \overline{Y_7}$$

$$D = Y_1 + Y_3 + Y_5 + Y_7 + Y_9 = \overline{Y_1} \overline{Y_3} \overline{Y_5} \overline{Y_7} \overline{Y_9}$$

可直接画出其逻辑图，如图 7-10 所示。

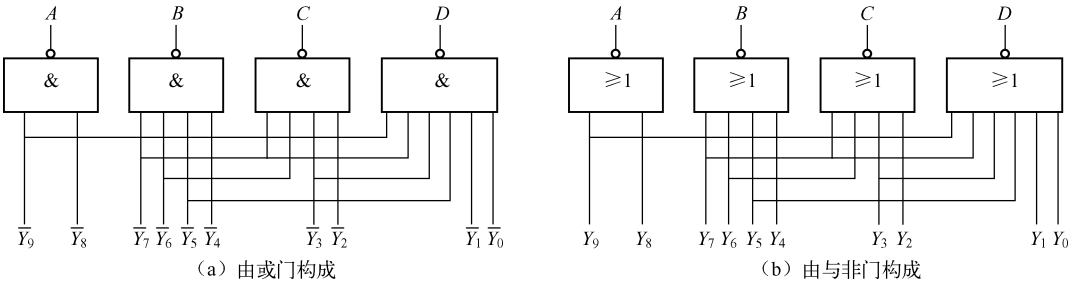


图 7-10 二—十进制编码器逻辑图

【想一想】

- (1) 普通版编码器与优先编码有何不同？
- (2) 我们可否用两块 74LS148 实现 16 线—4 线编码器？如果可以，应该如何设计？

7.4 译码器

在数字系统中，为了便于读取数据，通常大家用显示器件将熟悉的十进制数直观地显示出来。因此，在编码器和显示器件之间要进行翻译，这种翻译的过程称为译码，能够显示译码功能的逻辑电路称为译码器。常用的译码器有二进制译码器、二—十进制译码器和显示译

码器三种。

7.4.1 二进制译码器

将二进制代码翻译成对应的输出信号的电路称为二进制译码器。设二进制译码器的输入端为 n 个，则输出端为 $2n$ 个，且对应输入代码的每一种状态， $2n$ 个输出中只有一个为 1（或为 0），其余全为 0（或为 1）。

3 线—8 线译码器 74LS138 是最常用的一种二进制译码器，它的引脚外形和逻辑功能如图 7-11 所示。 A_2 、 A_1 、 A_0 为二进制译码输入端， $\overline{Y}_0 \sim \overline{Y}_7$ 为译码输出端（低电平有效）， G_1 、 G_{2A} 、 G_{2B} 为选通控制端。当 $G_1 = 1$ 、 $G_{2A} = G_{2B} = 0$ 时，译码器处于工作状态；当 $G_1 = 0$ 、 $G_{2A} = G_{2B} = 1$ 时，译码器处于禁止状态。74LS138 真值表见表 7-8。

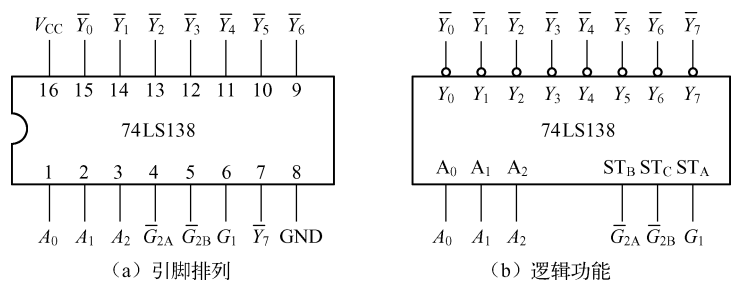


图 7-11 74LS138 引脚排列和逻辑功能

表 7-8 74LS138 真值表

输 入					输 出							
使 能		选 择										
G_1	$\overline{G_2}$	A_1	A_2	A_3	$\overline{Y_7}$	$\overline{Y_6}$	$\overline{Y_5}$	$\overline{Y_4}$	$\overline{Y_3}$	$\overline{Y_2}$	$\overline{Y_1}$	$\overline{Y_0}$
×	1	×	×	×	1	1	1	1	1	1	1	1
0	×	×	×	×	1	1	1	1	1	1	1	1
1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1
1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1
1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1
1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1
1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1

7.4.2 二—十进制译码器

将二—十进制代码翻译成 0 ~ 9 十个十进制数信号的电路称为二—十进制译码器。74LS42 是常用的二—十进制译码器。输入和输出都是低电平有效。它的引脚外形排列和逻辑功能如图 7-12 所示。74LS42 真值表见表 7-9。

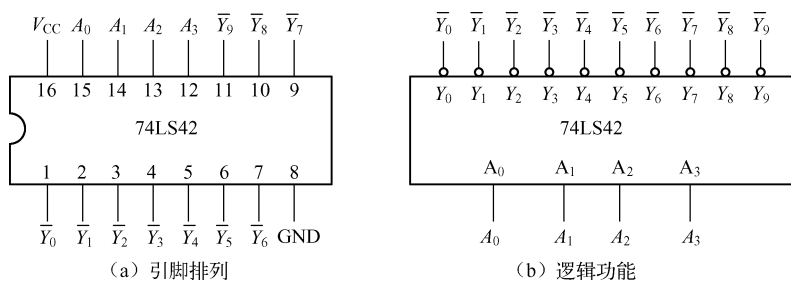


图 7-12 74LS42 引脚排列和逻辑功能

表 7-9 74LS42 的真值表

编号	输 入				输 出									
	A_3	A_2	A_1	A_0	\bar{Y}_0	\bar{Y}_1	\bar{Y}_2	\bar{Y}_3	\bar{Y}_4	\bar{Y}_5	\bar{Y}_6	\bar{Y}_7	\bar{Y}_8	\bar{Y}_9
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
3	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
4	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
5	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
6	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
7	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
8	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
9	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
伪码	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1



【想一想】

- (1) 译码的含义是什么？为什么说译码是编码的逆过程？译码器和编码器在电路组成上有什么不同？
- (2) 如何用两块 74LS138 组合成 4 线—16 线译码器？



【本章小结】

本章简明地介绍了组合逻辑电路的特点、分析方法和设计程序，以及常用组合逻辑电路中加法器、编码器、译码器和显示译码器的基本原理和分析方法。

(1) 组合逻辑电路的特点是电路没有记忆能力。它的输出仅取决于当时的输出状态，而与电路原来状态无关。

(2) 理解组合逻辑电路的一般分析方法和步骤：由逻辑图写出逻辑表达式；化简表达式；列出真值表；根据真值表分析电路的逻辑功能。

(3) 掌握组合逻辑电路的设计思路及步骤：根据实际问题的需要完成逻辑功能，列出真值表；根据真值表写出逻辑表达式，化简表达式（可用代数法或卡诺图化简），并画出化简后的表达式的逻辑图。

(4) 加法器是数字计算系统中进行算术运算的基本运算器，通过对半加器的理解，掌握全加器的原理。

(5) 掌握编码器、译码器的逻辑功能和使用方法。



【习题七】

7.1 组合逻辑电路的特点是该电路任一时刻的输出状态取决于该时该电路____信号，与信号作用前电路____无关。

7.2 组合逻辑电路逻辑功能的表达方法有____、____、____、____。

7.3 根据被编码信号的不同特点和要求，编码器可分为____、____、____、____。

7.4 判断下面命题的对与错。

(1) 数字电路可分为组合逻辑电路和时序逻辑电路两类。 ()

(2) 我们常用的计算机键盘是由译码器组成的。 ()

(3) 常见的8线—3线编码器中有8个输出端和3个输入端。 ()

7.5 用与非门设计一个举重裁判表决电路。设举重比赛有3个裁判，一个主裁判和两个副裁判。杠铃完全举上的裁决由每一个裁判按一下自己面前的按钮来确定。只有当两个或两个以上裁判判明成功，并且其中有一个为主裁判时，表明成功的灯才亮。

7.6 某技术培训班开设4门课程，其中A为必修课，B、C、D为选修课。培训章程规定，学员经考试后，必修课A且有2门选修课及格，方可获得结业证书。试设计一个能判断合格者的逻辑电路，并画出电路图。

第 8 章 时序逻辑电路

【主要内容】

- ☺ 时序逻辑电路的特点。
- ☺ 触发器、寄存器及计数器。

【重点和难点】

- ☺ 触发器、寄存器及计数器的分析。

8.1 时序逻辑电路的基础知识

前一章我们介绍了组合逻辑电路，这章介绍数字电路的另一类：时序逻辑电路，简称时序电路。它由逻辑电路和触发器两部分组成，如图 8-1 所示。

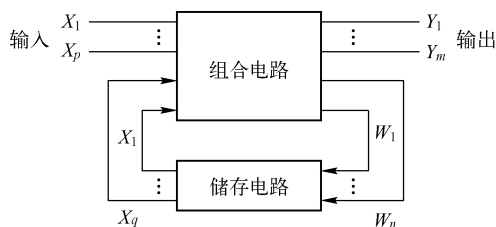


图 8-1 时序逻辑电路框图

8.1.1 时序逻辑电路的特点及逻辑功能的表示方法

时序逻辑电路的特点：电路任一时刻的输出状态不仅与同一时刻的输入信号有关，而且与电路原有的状态有关。时序电路逻辑功能的表示方法如下。

- (1) 逻辑方程（时钟方程、驱动方程、状态方程和输出方程）。
- (2) 状态转换表。
- (3) 状态转换图。
- (4) 时序图。

8.1.2 时序逻辑电路的分类

时序逻辑电路按时钟脉冲分为同步时序电路和异步时序电路两大类。同步时序电路是指电路中所有触发器都要受到同一时间信号脉冲的控制，它们的状态不在同一时刻发生。数字

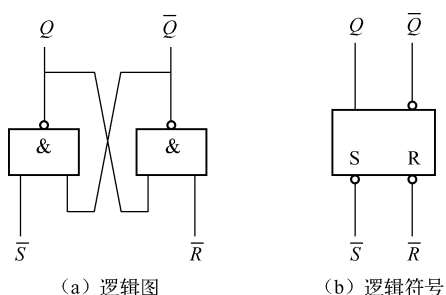
计算系统中的数码寄存器、计数器及数字显示电路等都是时序逻辑电路的基本单元电路。

8.2 触发器

触发器是数字电路中的另一类基本单元电路。触发器具备两个稳定状态（0 状态和 1 状态），能接收、保持和输出送来的信号。所以，触发器可以记忆 1 位二值信号。根据逻辑功能的不同，触发器可以分为 RS 触发器、同步触发器、JK 触发器、D 触发器、T 触发器；按照结构形式的不同，又可分为基本 RS 触发器、同步触发器、主从触发器和边沿触发器。

8.2.1 基本 RS 触发器

1. 基本 RS 触发器电路组成、逻辑符号及工作原理



将两个与非门的输入、输出端交叉相连就组成了一个基本 RS 触发器。它的逻辑图和符号如图 8-2 所示。信号输入 \bar{R} 、 \bar{S} 端，低电平有效， Q 端为触发器的输出端。但是要说明几个常用的术语：

“0”态：指 $Q=0, \bar{Q}=1$

“1”态：指 $Q=1, \bar{Q}=0$

图 8-2 基本 RS 触发器的逻辑图和逻辑符号

现态：用 Q^n 表示，代表触发器原来的状态（信号作用前的状态）；次态：用 Q^{n+1} 表示，代表

触发器经外界信号作用后的新状态。

基本 RS 触发器的工作原理如下。

(1) $\bar{R}=0, \bar{S}=1$ 时：由于 $\bar{R}=0$ ，不论原来 Q 为 0 还是 1，都有 $\bar{Q}=1$ ，再由 $\bar{S}=1, \bar{Q}=1$ 可得 $Q=0$ 。即不论触发器原来处于什么状态都将变成 0 状态，这种情况称为触发器置 0 或复位。 \bar{R} 端称为触发器的置 0 端或复位端。

(2) $\bar{S}=0$ 时：由于 $\bar{S}=0$ ，不论原来 \bar{Q} 为 0 还是 1，都有 $Q=1$ ；再由 $\bar{R}=1, Q=1$ 可得 $\bar{Q}=0$ 。即不论触发器原来处于什么状态都将变成 1 状态，这种情况称为触发器置 1 或置位。 \bar{S} 端称为触发器的置 1 端或置位端。

(3) $\bar{R}=1, \bar{S}=1$ 时：根据与非门的逻辑功能不难推知，触发器保持原有状态不变，即原来的状态被触发器储存起来，这体现了触发器具有记忆功能。

(4) $\bar{R}=0, \bar{S}=1$ 时： $Q=\bar{Q}=1$ ，不符合触发器的逻辑关系。并且由于与非门延迟时间不可能完全相等，当两个输入端的 0 同时撤除后，将不能确定触发器是处于 1 状态还是 0 状态。所以触发器不允许出现这种情况，这就是基本 RS 触发器的约束条件。

2. 基本 RS 触发器特征表、特征方程及信号波形图的画法

由上述分析可知，基本 RS 触发器具有置 0、置 1 和保持功能。其特征表（真值表）

见表 8-1。

表 8-1 基本 RS 触发器特征表

\bar{R}	\bar{S}	Q^n	Q^{n+1}	功 能
0	0	0	不用	不允许
0	0	1	不用	
0	1	0	0	$Q^{n+1}=0$ 置 0
0	1	1	0	
1	0	0	1	$Q^{n+1}=1$ 置 1
1	0	1	1	
1	1	0	0	$Q^{n+1}=Q^n$ 保持
1	1	1	1	

其特征方程为

$$\begin{cases} Q^{n+1} = S + \bar{R}Q^n \\ \bar{R} + \bar{S} = 1 \text{ (约束条件)} \end{cases}$$

反映触发器输入信号取值和状态之间对应关系的图形称为波形图。对于基本 RS 触发器信号波形图的画法根据其特征表画出。

【例 8-1】若与非门构成的基本 RS 触发器 \bar{R} 、 \bar{S} 上的信号波形如图 8-3 所示，试在输入波形下画出 Q 、 \bar{Q} 端的信号波形（假定触发器的初始状态 $Q=0$ ）。

解：已知 \bar{R} 、 \bar{S} 的波形，根据特征表可画出 Q 和 \bar{Q} 的波形，如图 8-3 所示。

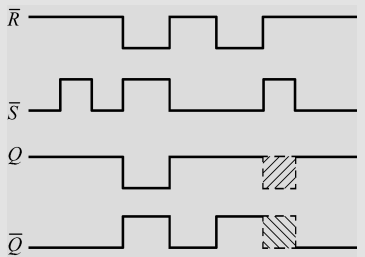


图 8-3 波形图

8.2.2 时钟控制的触发器

1. JK 触发器

根据逻辑功能的不同，触发器分为 RS、JK、D 和 T 触发器。前节对 RS 触发器做了介绍，本节将讨论 JK 触发器。

JK 触发器的逻辑符号如图 8-4 所示。其特征表见表 8-2，从特征表我们知道 JK 触发器是功能最齐全的，具有置 0、置 1、保持和翻转功能。

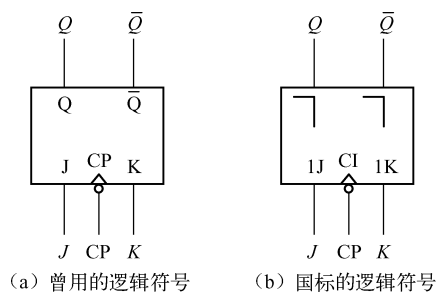


图 8-4 JK 触发器的逻辑符号

其特征方程为

$$Q^{n+1} = J\bar{Q}^n + \bar{K}Q^n \text{ (CP 下降沿到来时有效)}$$

表 8-2 JK 触发器的特征表

J	K	Q^n	Q^{n+1}	功 能
0	0	0	0	$Q^{n+1} = Q^n$ 保持
0	0	1	1	
0	1	0	0	$Q^{n+1} = 0$ 置 0
0	1	1	0	
1	0	0	1	$Q^{n+1} = 1$ 置 1
1	0	1	1	
1	1	0	0	$Q^{n+1} = \bar{Q}^n$ 翻转
1	1	1	1	

【例 8-2】已知 JK 触发器 CP、J、K 的信号波形如图 8-5 所示。试在它们的波形下画出 Q 端的信号波形（假定触发器的初始状态 $Q=0$ ）。

解：已知 CP、J、K 的波形，根据特征表可画出 Q 的波形，如图 8-5 所示。

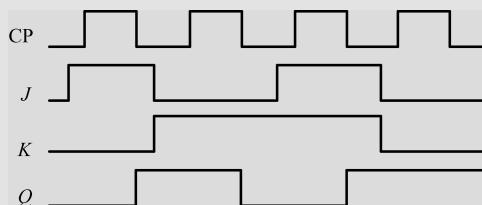


图 8-5 波形图

2. D 触发器

将 JK 触发器的 J 端信号通过非门 G 接到 K 端，使得 $K = \bar{J}$ 。触发器的输入信号从 J 端加入，这就构成了 D 触发器。逻辑图和逻辑符号如图 8-6 所示。其特征表见表 8-3，它具有跟

随功能。D 触发器信号及波形图可以根据其特征表画出。其特征方程为

$$Q^{n+1} = D(\text{CP 下降沿到来时有效})$$

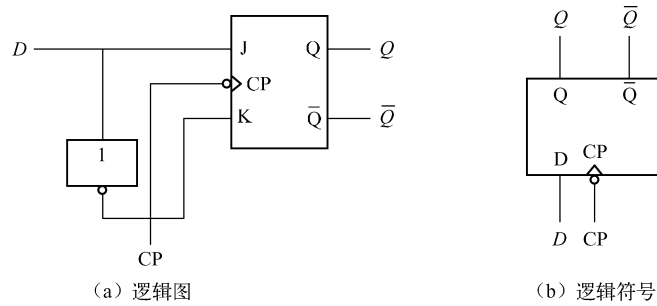


图 8-6 D 触发器的电路图和逻辑符号图

表 8-3 D 触发器特征表

D	Q^{n+1}	逻辑功能
0	0	置 0
1	1	置 1

3. T 触发器

把 JK 触发器的输入端 J、K 连接在一起作为输入端 T，这就构成了 T 触发器。逻辑图和逻辑符号如图 8-7 所示。其特征表见表 8-4，它具有保持、翻转功能。T 触发器信号波形图可以根据其特征表画出。T 触发器特征方程为

$$Q^{n+1} = T \overline{Q^n} + \overline{T} Q^n = T \oplus Q^n$$

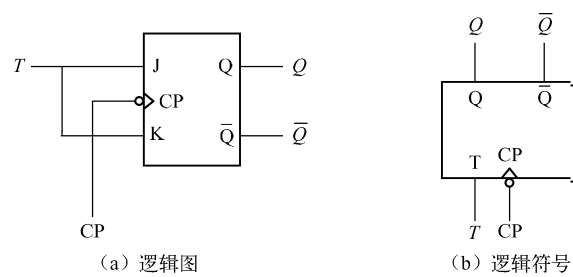


图 8-7 T 触发器的逻辑图和逻辑符号

表 8-4 T 触发器特征表

T	Q	Q^{n+1}	逻辑功能
0	0	0	$Q^{n+1} = Q^n$ 保持
0	1	1	
1	0	1	$Q^{n+1} = \overline{Q^n}$ 翻转
1	1	0	



【想一想】

- (1) 时序逻辑电路的特点是什么？
- (2) 触发器有哪两个稳定状态？它们是如何表示的？
- (3) 如何将 JK 触发器转化成 D 触发器和 T 触发器？

8.3 计数器

统计输入脉冲个数的功能称为计数，能实现计数操作的电路称为计数器。

计数器在数字电路中有广泛的应用，它除了用于计数外，还可用于分频、定时、测量等电路。

计数器种类很多。按计数器的进制不同，可分为二进制计数器、十进制计数器及 N 进制计数器；也可按计数器中的触发器是否同步翻转分类，可分为同步计数器和异步计数器；按计数器中的数字增减分类，可分为加法计数器、减法计数器和可逆计数器。

8.3.1 二进制计数器

1. 异步二进制加法计数器

如图 8-8 所示是 3 位异步二进制加法计数器，它由 3 个 JK 触发器组成，低位的输出端 Q_0 接到高一位的控制端 CP 处，只有最低位 FF_0 的控制端 CP 接收计数脉冲 CP。每个触发器的 J、K 都接高电平，处于计数状态。当各个触发器的控制端 CP 接收到由 1 变为 0 的负跳变信号时，触发器的状态就翻转。

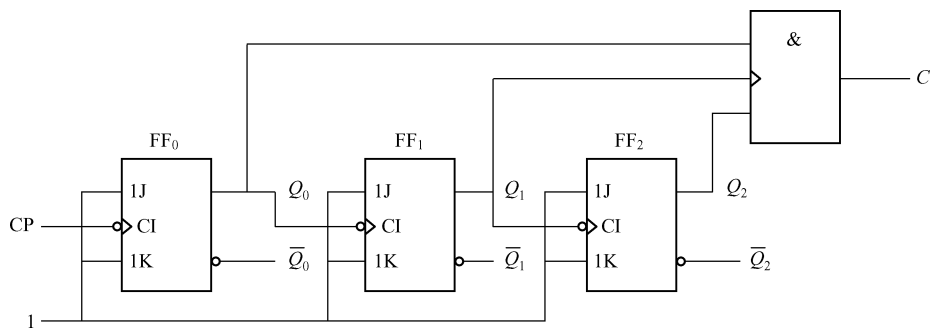


图 8-8 3 位异步二进制加法计数器

工作原理：FF₀ 每输入一个下降时钟脉冲翻转一次，FF₁ 在 Q_0 由 1 变 0 时翻转，FF₂ 在 Q_1 由 1 变 0 时翻转。按此规律，随着计数脉冲 CP 的不断输入，各触发器的状态见表 8-5。图 8-9 是它的波形图。

表 8-5 3 位异步二进制加法计数器状态表

输入 CP 脉冲序号	计数状态		
序号	Q_2	Q_1	Q_0
0	0	0	0

续表

输入 CP 脉冲序号	计数状态		
序号	Q_2	Q_1	Q_0
1	0	0	1
2	0	1	0
3	0	1	1
4	1	0	0
5	1	0	1
6	1	1	0
7	1	1	1
8	0	0	0

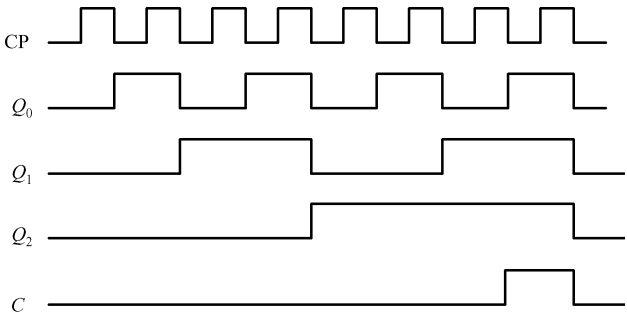


图 8-9 3 位异步二进制加法计数器的波形图

2. 异步二进制减法计数器

如图 8-10 所示是 3 位异步二进制减法计数器。电路与异步加法计数器相似，但连接方式把低位的 \bar{Q} 与高一位的 CP 端相连。因此，当低位触发器的状态 Q 由 0 变为 1，而 \bar{Q} 由 1 变为 0 即为负跳变脉冲。那么高一位触发器的 CP 端接收到这个负跳变脉冲时，它的状态就会翻转。而低位触发器的状态由 1 变为 0 时，高一位触发器将收到正跳变，其状态保持不变。依次类推，可列出 3 位异步二进制减法计数器的状态表，见表 8-6。

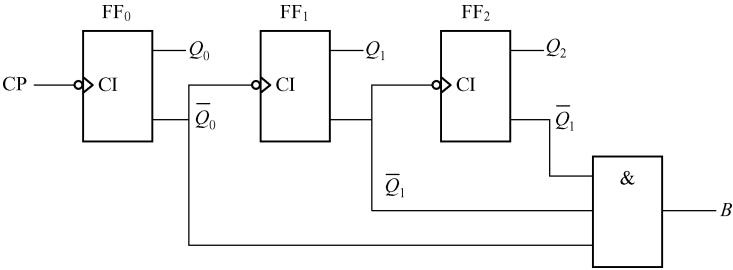


图 8-10 3 位异步二进制减法计数器

表 8-6 3 位异步二进制减法计数器状态表

输入 CP 脉冲序号	计数状态		
序号	Q_2	Q_1	Q_0
0	0	0	0
1	1	1	1
2	1	1	0
3	1	0	1
4	1	0	0
5	0	1	1
6	0	1	0
7	0	0	1
8	0	0	0

3. 二进制同步计数器

为了提高计数速度，应将技术脉冲送到每个触发器的时钟脉冲输入端 CP 处，使各个触发器的状态变化与计数器脉冲同步，用这种方式组成的计数器称为同步计数器。

3 位同步二进制加法计数器如图 8-11 所示。计数器中每个触发器翻转的条件是： FF_0 每输入一个时钟脉冲翻转一次， $J_0 = K_0 = 1$ ； FF_1 在 $Q_0 = 1$ 时，在下一个 CP 触发沿到来时翻转， $J_1 = K_1 = Q_0$ ； FF_2 在 $Q_0 = Q_1 = 1$ 时，在下一个 CP 触发沿到来时翻转， $J_2 = K_2 = Q_1 Q_0$ 。

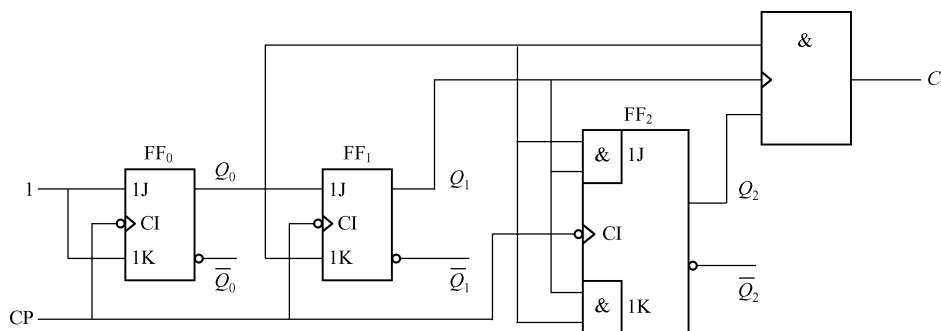


图 8-11 3 位同步二进制加法计数器

8.3.2 十进制计数器

二进制计数器结构简单，运算方便。但是，人们对二进制数总不如对十进制数那么熟悉，因此，在有些场合，应用十进制计数器，显得比较方便。下面介绍异步十进制加法计数器。

异步十进制加法计数器如图 8-12 所示。它由 4 个负边沿触发的 JK 触发器组成，其中 FF_3 的输入端 J 的信号，是 Q_1 、 Q_2 的逻辑与 FF_3 的输出信号 \bar{Q} 反馈到 FF_1 的 J 端。

由逻辑图可以看出异步十进制加法计数器是在异步二进制加法计数器的基础上改进而成的。

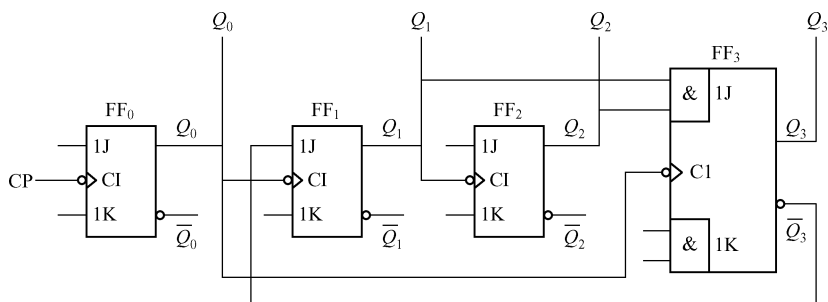


图 8-12 异步十进制加法计数器

如果计数器从 0000 开始计数，由图 8-12 可知，在第八个脉冲以前 FF_0 、 FF_1 、 FF_2 的 J 和 K 始终为 1，即工作在翻转状态，因而工作过程和异步二进制加法计数器相同。在此期间虽然 Q_0 输出的脉冲也送给了 FF_3 ，但由于每次 Q_0 的下降沿到达时 $J_3 = Q_1 = Q_2 = 0$ ，所以 FF_3 一直保持 0 状态不变。

而第八个计数脉冲输入时，由于 $J_3 = K_3 = 1$ ，所以 Q_0 下降沿到达后， Q_3 由 0 变为 1。

同时， J_1 也随 $\overline{Q_3}$ 变为 0。第九个计数脉冲输入后，电路状态变为 $Q_3 Q_2 Q_1 Q_0 = 1001$ ，第十个计数脉冲输入后， FF_0 翻成 0，同时 Q_0 的下降沿使 FF_3 也置为 0，于是，电路从 1001 返回到 0000，跳过了 1010 ~ 1111 这 6 个状态，成为十进制计数器。

8.4 寄存器

8.4.1 数码寄存器

寄存器是一种重要的数字逻辑器件，常用于接收、暂存、传递数码、指令等信息。我们知道一个触发器有两个稳定状态，可以存放 1 位二进制数码。如果要存放 n 位二进制数码，就需要 n 个触发器组成的寄存器储存。

按照功能的不同，寄存器分为数码寄存器和移位寄存器。数码寄存器是简单的存储器，只具备接收、暂存数码和清除原有数码的功能。如图 8-13 所示是用 D 触发器组成的 4 位数码寄存器。4 个触发器的时钟脉冲输入端连在一起，作为接收数码的控制端。 $D_0 \sim D_3$ 为寄存器的数码输入端， $Q_0 \sim Q_3$ 为数据的输出端，各触发器的输入端连在一起作为寄存器的总清零端 \overline{CR} 低电平有效。其工作过程如下。

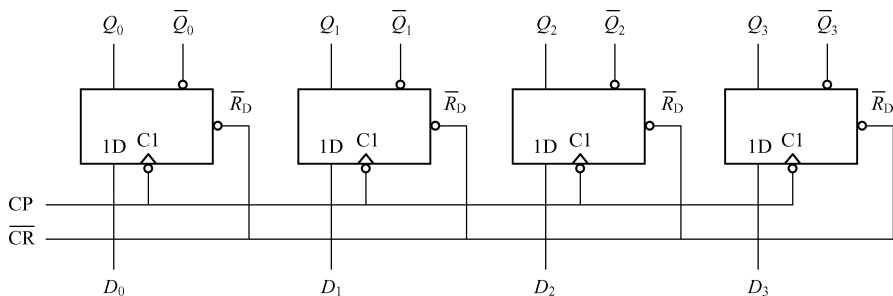


图 8-13 4 位数码寄存器

(1) 清零。 $\overline{CR}=0$ 时，异步清零。即有 $Q_3^n Q_2^n Q_1^n Q_0^n = 0000$ 。

(2) 送数。 $\overline{CR}=1$ 时，CP 上升沿送数。即有： $Q_3^{n+1} Q_2^{n+1} Q_1^{n+1} Q_0^{n+1} = D_3 D_2 D_1 D_0$ 。

(3) 保持。 $\overline{CR}=1$ 时，CP 上升沿以外时间，寄存器内容将保持不变。

不难看出，这种寄存器在接收数码时，各位数码是同时输入；输出数码时，也是同时输出。因此，这种寄存器被称为并行输入、并行输出数码寄存器。

8.4.2 移位寄存器

移位寄存器是在数码寄存器的基础上发展而来的，它除了有存放数码的功能外，还具有数码移位的功能。移位寄存器分为单向移位寄存器和双向移位寄存器两大类。

1. 单向移位寄存器

1) 右移寄存器

所谓右移是指把数据从触发器的低位移向触发器的高位。图 8-14 是用 D 触发器组成的 4 位右移寄存器。其中，FF₀ 是最高位的触发器，FF₃ 是最低位的触发器，从左到右依次排列。每个高位触发器的输入端 Q 与低一位触发器的输入端 D 相接。整个电路只有最高位触发器 FF₀ 的输入端 D 接收输入的数码。

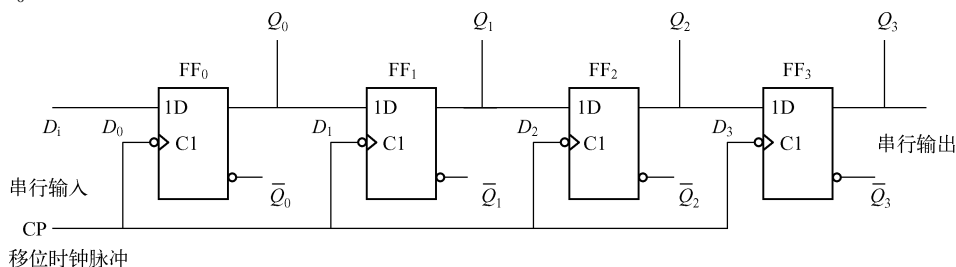


图 8-14 4 位右移寄存器

该电路的逻辑功能分析如下。

(1) 列方程。

时钟方程： $CP_0 = CP_1 = CP_2 = CP_3 = CP$

驱动方程： $D_0 = D_i$ 、 $D_1 = Q_0^n$ 、 $D_2 = Q_1^n$ 、 $D_3 = Q_2^n$

状态方程： $Q_0^{n+1} = D_i$ 、 $Q_1^{n+1} = Q_0^n$ 、 $Q_2^{n+1} = Q_1^n$ 、 $Q_3^{n+1} = Q_2^n$

(2) 列出特征表（见表 8-7）。

表 8-7 右移寄存器特征表

输 入	现 态	次 态	说 明
D_i CP	Q_0^n Q_1^n Q_2^n Q_3^n	Q_0^{n+1} Q_1^{n+1} Q_2^{n+1} Q_3^{n+1}	
1 ↑	0 0 0 0	1 0 0 0	连续输入 4 个 1； ↑ 表示上升沿
1 ↑	1 0 0 0	1 1 0 0	
1 ↑	1 1 0 0	1 1 1 0	
1 ↑	1 1 1 0	1 1 1 1	

我们从特征表中可以发现，右移寄存器具有串行输入、串行输出的功能。

2) 左移寄存器

左移就是把数据从触发器的高位移向低位。4 位左移寄存器如图 8-15 所示。它也是由 4 个 D 触发器构成，电路结构与右移寄存器相似，不同的是串接的顺序变为由高位到低位。寄存的数码从高位的高位 D 端输入，再从最低位 Q_0 串行输出。

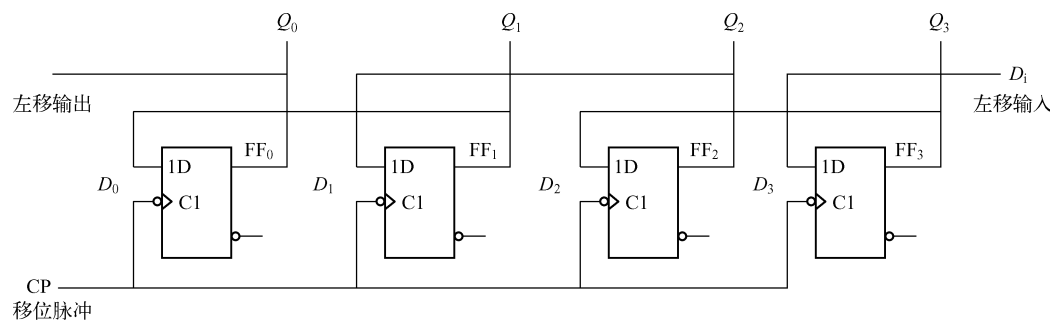


图 8-15 4 位左移寄存器

该电路的逻辑功能分析如下。

(1) 列方程。

时钟方程： $CP_0 = CP_1 = CP_2 = CP_3 = CP$

驱动方程： $D_0 = Q_1^n$ 、 $D_1 = Q_2^n$ 、 $D_2 = Q_3^n$ 、 $D_3 = D_i$

状态方程： $Q_0^{n+1} = Q_1^n$ 、 $Q_1^{n+1} = Q_2^n$ 、 $Q_2^{n+1} = Q_3^n$ 、 $Q_3^{n+1} = D_i$

(2) 列出特征表（见表 8-8）。

表 8-8 左移寄存器特征表

输 入	现 态				次 态				说 明
D_i CP	Q_0^n	Q_1^n	Q_2^n	Q_3^n	Q_0^{n+1}	Q_1^{n+1}	Q_2^{n+1}	Q_3^{n+1}	
1 ↑	0	0	0	0	0	0	0	0	连续输入 4 个 1； ↑ 表示上升沿
1 ↑	1	0	0	0	0	0	1	1	
1 ↑	1	1	0	0	0	1	1	1	
1 ↑	1	1	1	0	1	1	1	1	

单向移位寄存器具有以下主要特点。

(1) 单向移位寄存器中的数码，在 CP 脉冲的操作下，可以依次右移或者左移。

(2) n 位单向移位寄存器可以寄存 n 位二进制数码， n 个 CP 脉冲即可完成串行输出操作。

(3) 若串行输入端状态为 0，则 n 个 CP 脉冲后，寄存器便被清零。

2. 双向移位寄存器

在数字电路中，常需要寄存器按不同的控制信号能够左移或者右移。具有既能右移又能左移两种工作方式的寄存器称为双向移位寄存器。

集成 4 位双向移位寄存器 74LS194 的引脚排列如图 8-16 所示。74LS194 的控制引脚说明见表 8-9。

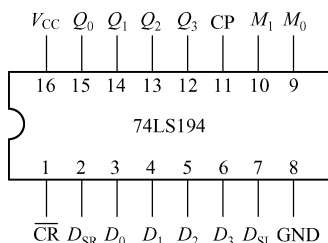


图 8-16 74LS194 的引脚排列

表 8-9 74LS194 的控制引脚说明

$\overline{\text{CR}}$	M_1	M_0	CP	工作状态
0	×	×	×	异步清零
1	0	0	×	保持
1	0	1	↑	右移
1	1	0	↑	左移
1	1	1	×	并行输入



【想一想】

- (1) 寄存器有哪两种类型？
- (2) 数码寄存器的工作原理是什么？
- (3) 移位寄存器有哪些功能？



【本章小结】

(1) 时序逻辑电路是数字系统中的重要组成部分。本章主要介绍时序逻辑电路的特点、分析和设计方法，重点介绍触发器、常用的基本时序电路——寄存器和计数器，并讨论它们的电路组成、工作原理，以及它们的实际应用。

(2) 本章的基本要求。

① 理解时序逻辑电路的特点。

时序逻辑电路的输出状态不仅与当时的输入状态有关，而且还与电路原来的状态有关。

从电路结构上来看，时序逻辑电路一定包含触发器。它通常由具有控制作用的逻辑门电路和具有记忆功能的触发器两部分组成。

② 掌握各种常用触发器的特征方程、特征表、功能和各种表示方法。

③ 掌握寄存器的逻辑功能。

寄存器具有接收、寄存和输出数码的功能。它是计算机电路的重要部件。本章介绍了两类寄存器：数码寄存器和移位寄存器。数码寄存器采用并行输入、并行输出的方式，接收、存储和输出数码，它没有移位的逻辑功能。移位寄存器不仅具有数码寄存器存储信息的功能，而且具有数码移位的逻辑功能（左移、右移及双向移位）。

④ 掌握计数器的技术功能，即对输入的时钟脉冲进行计数的功能。

(3) 在时序逻辑电路的学习中，不论是寄存器还是计数器，都要努力掌握时序逻辑电路的分析方法。



【习题八】

8.1 触发器具有_____个稳定状态，在输入信号消失后，它能保持_____不变。

8.2 “与非”门构成的基本 RS 触发器，输入端是_____和_____；输出端是_____和_____，将_____称为触发器状态的 0 状态，_____称为触发器的 1 状态。

8.3 在时钟脉冲下，JK 触发器输入端 $J=0$ 、 $K=0$ 时触发器状态为_____； $J=0$ 、 $K=1$ 时触发器状态为_____； $J=1$ 、 $K=0$ 时触发器状态为_____； $J=1$ 、 $K=1$ 时触发器状态随 CP 脉冲的到来而_____。

8.4 在 CP 脉冲到来后，D 触发器的状态与其_____的状态相同。

8.5 T 触发器受 T 端输入信号控制，T 为_____时，不计数；T 为_____时，计数，因此，它是一种可控的计数器。

8.6 寄存器具有_____、_____和_____数码的功能。它可分为_____和_____两大类。

8.7 双向移位寄存器中的数码既能_____，又能_____。

8.8 判断下面命题的对与错。

(1) 当 CP 处于下降沿时，触发器的状态一定发生翻转。()

(2) T 触发器是 JK 触发器在 $J=K$ 条件下的特殊情况下的电路。()

(3) 左移移位寄存器的串行输入端应按照先高位后低位顺序输入代码。()

(4) 计数器计数前无须先清零。()

(5) 在异步计数器中，当时钟脉冲达到时，各触发器的翻转是同时发生的。()

第9章 脉冲波形的产生与变换

【主要内容】

- ☺ 555 定时器的构成及工作原理。
- ☺ 555 定时器的应用。

【重点和难点】

- ☺ 555 定时器的应用。

9.1 555 定时器的构成及工作原理

脉冲波形的产生与变换一般有两种方法：一种是利用单稳态触发器、施密特触发器，另一种是由多谐振荡器来完成。这些电路通常用 555 定时器和外接几个阻容元件构成。555 定时器是一种多用途的单片集成电路，它有双极型和单极型 CMOS 两大类，双极型产品型号的最后 3 位数字是 555，CMOS 产品型号的最后 4 位数字是 7555。下面以 CC7555 集成定时器为例进行分析。

图 9-1 (a) 是 CC7555 内部结构的简化电路，图 9-1 (b) 是它的引脚排列。电路有两个电压比较器 C_1 和 C_2 、一个 RS 触发器、一个放电管 V、两个反相器 G_1 和 G_2 、3 个 $5k\Omega$ 的电阻构成分压器（故命名为 555 电路）。

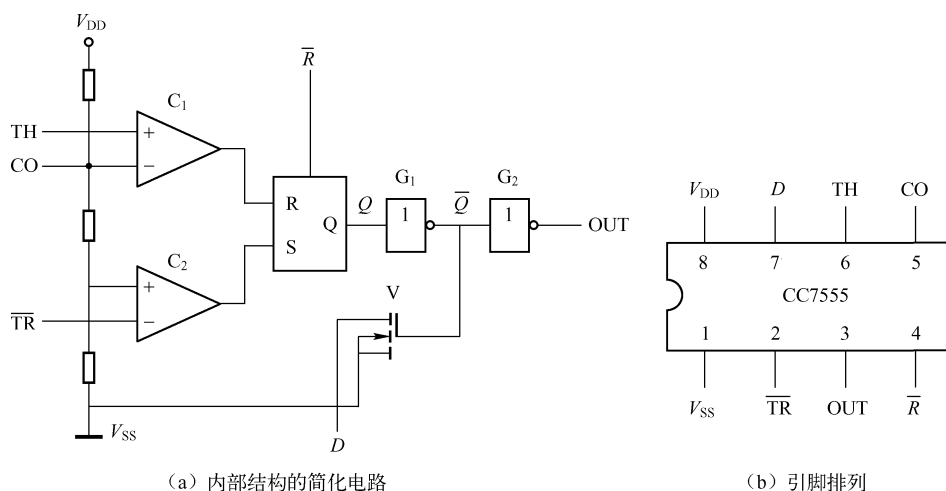


图 9-1 CC7555 定时器

1. RS 触发器

RS 触发器的状态受比较器 C_1 和 C_2 的控制。 \overline{R} 为直接置 0 端，即在 \overline{R} 端加低电平可使定时器直接置 0 ($Q=1$, $\overline{Q}=1$, $OUT=0$)， \overline{R} 端不用时，应接高电平。

2. 电压比较电路

电压比较器 C_1 和 C_2 与 3 个分压电阻构成电压比较电路。

(1) 当阈值输入端 TH 电压超过 V_{DD} 时，电压比较器 C_1 输出高电平，使 RS 触发器置 0，输出 $Q=0$ ，而 $\overline{Q}=1$ 使放电管 V 导通。

(2) 当触发输入端 \overline{TR} 电压低于 $(1/3)V_{DD}$ 时，电压比较器 C_2 输出高电平，使 RS 触发器置 1，输出 $Q=1$ ，而 $\overline{Q}=0$ 使放电管 V 截止。

(3) 当阈值输入端 TH 电压低于 $(2/3)V_{DD}$ 、触发输入端 \overline{TR} 电压高于 $(1/3)V_{DD}$ 时，电压比较器 C_1 、 C_2 输出为 0，即 R 、 S 均为 0，输出维持不变。

(4) 如果在控制端 CO 外加一控制电压，可改变电路的阈值输入电压和触发器输入电压。若 CO 端不用，一般都接一个 $0.01\mu F$ 的电容到地，以旁路高频交流信号，保证该端电压稳定在 $(2/3)V_{DD}$ 。

3. 放电管 V 和输出缓冲器 G_1 、 G_2

放电管 V 的状态受 \overline{Q} 控制，当 $\overline{Q}=0$ 时，V 截止；当 $\overline{Q}=1$ 时，V 导通，外接电容可经 D 端通过 V 放电，所以称 D 为放电端。

表 9-1 555 定时器功能表

阈值输入 TH	触发输入端 \overline{TR}	复位 \overline{R}	输出 OUT	开关管 V
x	x	0	0	导通
$>(2/3)V_{DD}$	$>(1/3)V_{DD}$	1	0	导通
$<(2/3)V_{DD}$	$>(1/3)V_{DD}$	1	原状态	原状态
$<(2/3)V_{DD}$	$<(1/3)V_{DD}$	1	1	截止

9.2 555 定时器的应用

9.2.1 用 CC7555 构成的单稳态触发器

单稳态触发器只有一种稳定状态，如果没有外加触发信号，则电路保持这一稳定状态不变；当外加触发信号时，电路能够从稳定状态翻转到另一种状态，但这个状态只是暂时的，称这个状态为暂稳态，经过一段时间后，靠电路自身的作用又自动返回到原来的稳定状态。暂稳态维持时间的长短仅取决于电路的本身参数，与外加触发信号无关。

由 CC7555 构成的单稳态触发器电路如图 9-2 (a) 所示。图中, R_T 、 C_T 为外接定时元件, 输入触发信号加在 \overline{TR} 端。下面分析电路的工作过程。

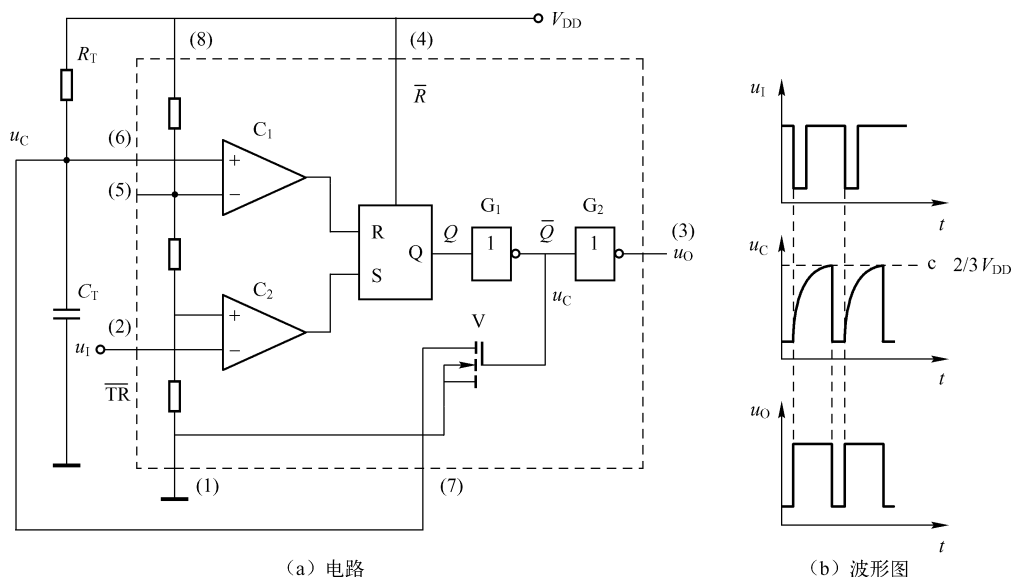


图 9-2 CC7555 定时器构成的单稳态触发器

1. 稳态

当接通电源后, 电源 V_{DD} 通过 R_T 向 C_T 充电, 当电容电压 $u_c \geq (2/3)V_{DD}$ 时。电压比较器 C_1 输出高电平, 触发器置 0, 输出端电压 $U_0 = 0$, $\overline{Q} = 1$, 放电管 V 导通, 定时电容 C_T 通过 V 放电使 U_c 下降; 这时只要 \overline{TR} 端电压大于 $(1/3)U_c$, 输出一直维持低电平不变, 电路处于稳定状态。

2. 暂稳态

当触发输入端 \overline{TR} 输入负脉冲, 且低于 $(1/3)V_{DD}$ 时, 这时电压比较器 C_2 输出高电平, RS 触发器置 1, $Q = 1$, $\overline{Q} = 0$, 电路输出的低电平跳变到高电平, 放电管 V 截止, V_{DD} 又对定时电容 C_T 充电, 电路处于暂稳态。 C_T 的充电回路由 $V_{DD} \rightarrow R_T \rightarrow C_T \rightarrow$ 地。充电时间为 $R_T C_T$, 当充电电压 U_c 上升到 $(2/3)V_{DD}$ 时, 电压比较器 C_1 输出高电平, 使 RS 触发器置 0, $Q = 0$, $\overline{Q} = 1$, 放电管 V 导通, C_T 又通过 V 放电, 电路结束暂稳态自动返回到稳态。电路输出又从高电平跳变到低电平, 完成了一次单稳态触发的全过程。其工作波形如图 9-2 (b) 所示。

3. 输出脉冲宽度 t_w

输出脉冲宽度取决于充电的时间常数 $R_T C_T$ (即 U_c 由零被充电到 $(2/3)V_{DD}$ 所需时间)。按经验公式算:

$$t_w \approx 1.1 R_T C_T$$

9.2.2 用 CC7555 构成的多谐振荡器

多谐振荡器又称为矩形波发生器，是一种无稳态电路，只有两个暂稳态。它无须外加触发信号，只要接通电源就能自动产生一定频率和一定宽度的矩形脉冲。

由 CC7555 构成的多谐振荡器如图 9-3 所示。图中， R_1 、 R_2 、 C_T 为外接定时元件。下面分析它的工作过程。

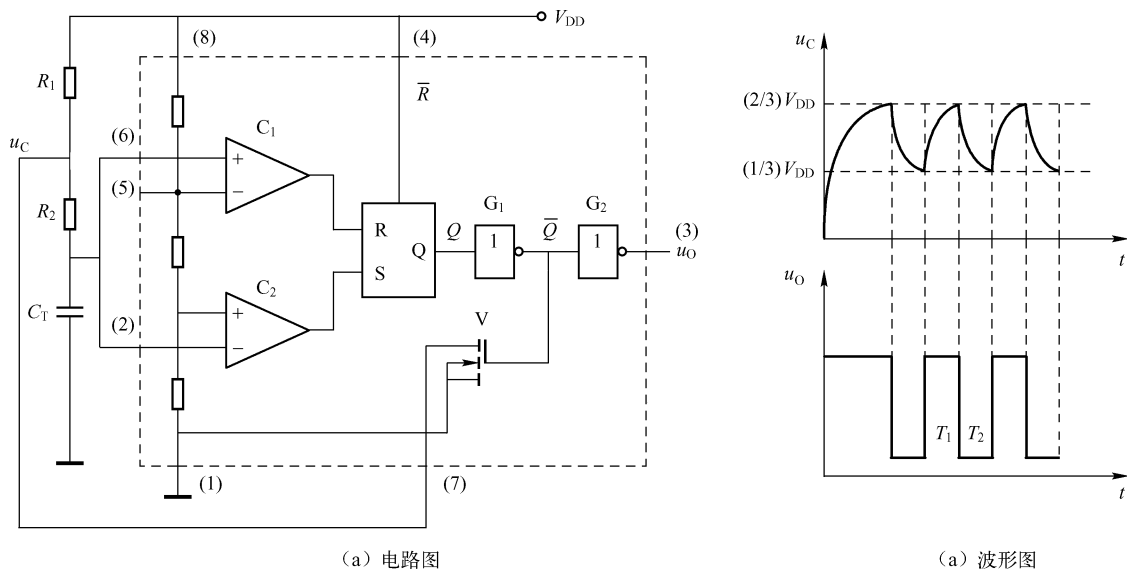


图 9-3 CC7555 构成的多谐振荡器

1. 第一暂稳态

接通电源的瞬间，电容 C_T 来不及充电，电容器两端的电压 $U_C = 0$ ，电压比较器 C_1 输出为低电平， C_2 输出为高电平，此时 RS 触发器置 1， $Q = 1$ 、 $\bar{Q} = 0$ 使放电管 V 截止。 V_{DD} 对定时电容 C_T 充电，充电回路为 $V_{DD} \rightarrow R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow C_T \rightarrow$ 地，充电时间为 $(R_1 + R_2) C_T$ ，电路处于第一暂稳态。

2. 第二暂稳态

当定时电容电压上升到 $(2/3)V_{DD}$ 时，电压比较器 C_1 输出高电平，使 RS 触发器置 0， $Q = 0$ 、 $\bar{Q} = 1$ ，此时结束第一暂稳态，放电管 V 导通，定时电容放电，放电回路为 $u_C \rightarrow R_2 \rightarrow V \rightarrow$ 地，放电时间为 $R_2 C_T$ ，电路处于第二暂稳态。

当定时电容放电下降到小于 $(1/3)V_{DD}$ 时，电压比较器 C_1 输出低电平， C_2 输出为高电平，此时 RS 触发器又置 1， $Q = 1$ ， $\bar{Q} = 0$ ，使放电管 V 截止，结束第二暂稳态。重复上述过程，产生振荡，在输出端得到持续的矩形脉冲。其波形图如图 9-3 (b) 所示。

3. 振荡周期 T

由输出波形可知，振荡周期是电容 C_T 的充电时间 T_1 与放电时间 T_2 之和。按经验公式

计算：

$$T = T_1 + T_2 \approx 0.7(R_1 + 2R_2)C_T$$

9.2.3 用 CC7555 构成的施密特触发器

施密特触发器有两个稳定的状态，不仅这两个稳定状态的转换需要外加触发信号，而且稳定状态的维持依赖于外加触发信号，因此它是一种电平触发方式的电路。施密特触发器最大的特点是：它可以将不规则变化的波形输入变化成良好的矩形波输出，而且抗干扰能力很强。

由 CC7555 构成的施密特触发器电路如图 9-4 (a) 所示。图中，将阈值输入端 TH 和触发输入端 \overline{TR} 连接在一起作为电路的输入端。假设输入信号波形是三角波，很容易分析它的工作过程。

(1) 当输入电压 u_i 小于 $(1/3)V_{DD}$ 时，RS 触发器置 1，输出 u_o 为高电平，电路处于第一稳态。

(2) 当输入电压 u_i 上升到 $(2/3)V_{DD}$ 时，RS 触发器置 0，输出 u_o 为低电平，电路处于第二稳态。

(3) 当输入电压 u_i 从最大值下降到 $(1/3)V_{DD}$ 时，电路输出又为高电平，即回到了第一稳态。如此循环可得到图 9-4 (b) 所示的波形。

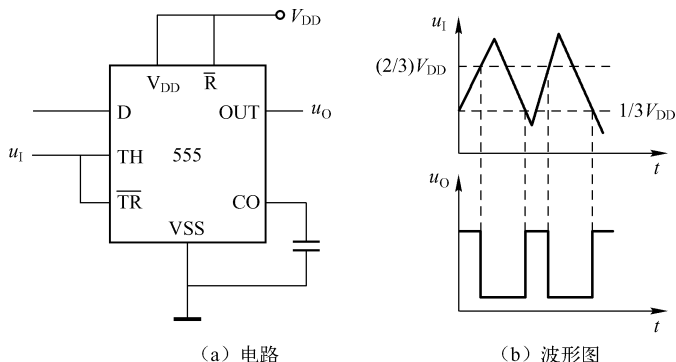


图 9-4 CC7555 定时器构成的施密特触发器



【本章小结】

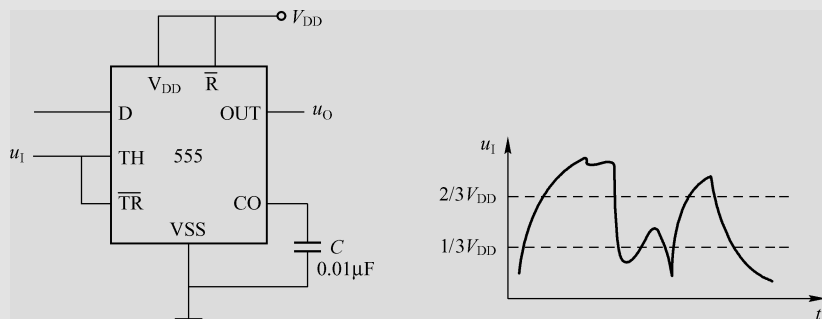
- (1) 555 定时器是一种多用途的单片集成电路，分为双极型和单极型 CMOS 两大类。
- (2) 单稳态触发器、多谐振荡器、施密特触发器可以产生与变换脉冲波形。这些电路可利用 555 定时器灵活构成。
- (3) 单稳态触发器只有一个稳态需外加触发信号转为暂稳态；多谐振荡器没有稳态，只有两个暂稳态，暂稳态间的转换无须外加触发信号，靠电路内部和定时元件自动完成；施密特触发器有两个稳态，受两个触发电平控制。



【习题九】

9.1 用 555 定时器可以构成哪些常用电路？

9.2 由 555 定时器组成的施密特触发器如图题 9-1 所示，已知输入电压 u_i 的波形如图题 9-1 所示，试画出输出电压 u_o 的波形。



图题 9-1

第 10 章 D/A 转换与 A/D 转换

【主要内容】

☺ D/A 转换器。

☺ A/D 转换器。

【重点和难点】

☺ D/A 转换器。

随着现代电子技术的发展、数字电路的广泛应用，数字电路只能对数字信号进行处理，而自然界中大部分物理量是模拟量，所以要使数字电路能够处理模拟信号，必须将模拟信号转换成数字信号，即要用模/数转换器（A/D 转换器）；有时又要把处理过的数字信号转换成模拟信号，即要用数/模转换器（D/A 转换器）。

10.1 D/A 转换器

D/A 转换器是将数字量转换成与之成比例的模拟量的电路。D/A 转换器有：权电阻网络、T 形电阻网络、倒 T 形电阻网络等几种电路形式。一般 D/A 转换器由电阻译码网络、模拟开关、基准电源及求和运算放大器四部分组成。下面以权电阻网络为例阐述 D/A 转换器的工作过程。

10.1.1 权电阻网络 D/A 转换器

图 10-1 为一个 4 位权电阻网络 D/A 转换器，它主要由权电阻网络 D/A 转换电路和求和运算放大器组成。其中权电阻网络 D/A 转换电路是核心。求和运算放大器构成一个电流电压变换器，将流过各权电阻的电流相加，并转换成与输入数字量成正比的模拟电压输出； $D_0 \sim D_3$ 是输入端，为数字量，转换后输出模拟的电压为

$$u_0 = -\frac{V_{\text{REF}} \cdot R_F}{2^3 R} (2^3 D_3 + 2^2 D_2 + 2^1 D_1 + 2^0 D_0)$$

权电阻网络还可以对 n 位数字量进行转换，若输入数字量 $D_{n-1} \sim D_0$ ，此时对应输出模拟电压为

$$u_0 = -\frac{V_{\text{REF}} \cdot R_F}{2^{n-1} R} (2^{n-1} D_{n-1} + 2^{n-2} D_{n-2} + \cdots + 2^1 D_1 + 2^0 D_0)$$

当 $R_F = 1/2R$ 时有

$$u_0 = -\frac{V_{\text{REF}}}{2^n} (2^{n-1} D_{n-1} + 2^{n-2} D_{n-2} + \cdots + 2^1 D_1 + 2^0 D_0)$$

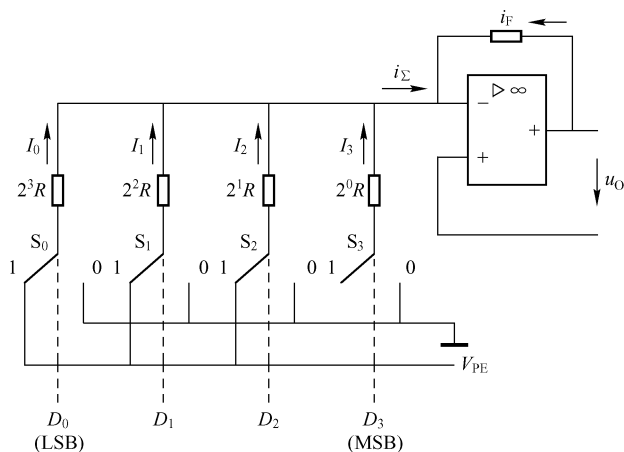


图 10-1 4 位权电阻网络 D/A 转换器

10.1.2 D/A 转换器的主要参数

1. 分辨率

分辨率是指最小输出电压与最大输出电压之比。最小输出电压就是对应于输入数字量的最低位 (LSB) 为 1, 其余各位为 0 时的输出电压, 用 U_{LSB} 表示。最大输出电压就是对应于输入量的各位都是 1 时的输出电压, 用 U_{FSR} 表示。所以, 对应一个 n 位的 D/A 转换器, 分辨率为

$$\text{分辨率} = \frac{U_{\text{LSB}}}{U_{\text{FSR}}} = \frac{1}{2^n - 1}$$

2. 转换精度

转换精度是指输出模拟电压的实际值和理论输出模拟电压的最大误差, 主要是由参考电压偏离标准值、求和运算放大器的零点漂移、电阻值的误差、模拟开关的压降等因素引起的。

3. 转换时间

转换时间是指 D/A 转换器在输入数字信号开始转换, 到输出模拟电压达到稳定值所需要的时间。它是反映 D/A 转换器工作速度的指标。

10.2 A/D 转换器

10.2.1 A/D 转换的一般步骤

A/D 转换一般需要经过 4 个步骤: 采样、保持、量化和编码。

1. 采样—保持

采样是对在时间上连续变化的模拟量转换成在时间上断续变化的模拟量。如果为了能不失真地恢复原有的模拟信号，一般要求采样频率 $f_s \geq 2f_{\max}$ (f_{\max} 为输入模拟信号频谱中的最高频率)。

由于采样时间很短，采样输出是一串断续的脉冲，量化电路来不及数字化，因此在两次采样间，须将采样的模拟信号暂时保存起来，并保持到下一采样脉冲到来之前。这就要在采样后加上保持电路。图 10-2 是实际的采样—保持电路。用频率为 f_s 的周期脉冲 u_s 控制场效应管 V 栅极电位，场效应管 V 导通期间输入信号储存在电容上；场效应管 V 截止期间电容上电压保持截止前的数值，直到下一次导通时电容上电压再变化。

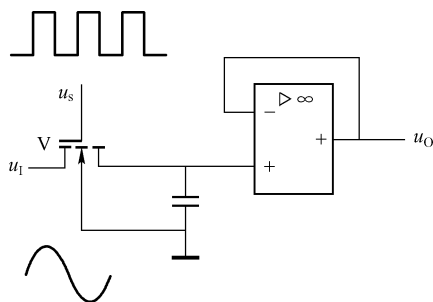


图 10-2 采样—保持电路

2. 量化—编码

模拟信号经采样—保持电路后，得到了连续模拟信号的样值脉冲，它们还是模拟信号在给定时间上的瞬时值，而不是数字信号，还须进一步把每个样值脉冲转换成与它的幅度成正比的数字量。具体转换过程是将采样—保持电路输出的模拟信号的样值脉冲电压，用一个规定的量化单位去度量，最终模拟量可用这个量化单位的整数倍来表示。量化后的结果用代码表示，称为编码。

10.2.2 A/D 转换器的工作原理

A/D 转换器有很多种类型，一般分为直接转换型和间接转换型。直接转换型可分为：逐次逼近型 A/D 转换器、并行 A/D 转换器、计数型 A/D 转换器；间接转换型可分为：单积分型 A/D 转换器、双积分型 A/D 转换器。下面以逐次逼近型 A/D 转换器为例来加以阐述。

逐次逼近型转换器的原理如图 10-3 所示，它由 D/A 转换器、电压比较器、比较寄存器和控制逻辑电路及时钟发生器组成。其转换原理是：控制逻辑电路使比较寄存器逐次产生已知数字量，并送入 D/A 转换器，产生对应的已知电压，该电压与输入模拟量进行比较，逐次逼近输入模拟量，转换结束后，比较寄存器保留了对应输入模拟量的数字量，并输出此数字量。

转换由高位开始，首先转换信号使比较寄存器的最高位置 1，其余置 0。则比较寄存器的状态为 100...00，该状态使 D/A 转换器输出 u'_0 与 u_0 进行比较，若 $u_1 > 0.5U_{\max}$ ，则比较寄

存器最高位 1 保留，反之清除为 0，然后将比较器的次高位置 1，使 D/A 转换器的输出电压 u'_0 增加 $0.25U_{\max}$ ，与 u_i 进行第二次比较，若 $u_i > u'_0$ ，比较寄存器的次高位 1 保留，否则清除为 0。按同样方法继续比较，比较寄存器最后得到的各位数字就是对应模拟输入电压的数字量输出。

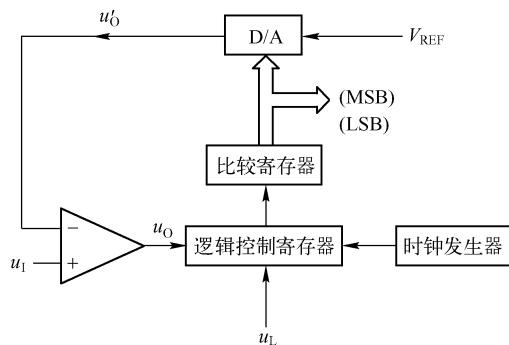


图 10-3 逐次逼近型 A/D 转换器的原理

10.2.3 A/D 转换器的主要参数

1. 分辨率

通常以输出数字量的位数区分分辨率的高低，位数越多，量化单位越小，对输入信号的分辨能力就越高。

2. 转换误差

转换误差是指转换器输出的数字量和理想数字量的差别。通常以最低有效位的倍数表示。

3. 转换速度

转换速度是指完成一次转换所需要的时间。



【想一想】

- (1) 试简述电阻网络实现 D/A 转换器的工作原理。
- (2) A/D 转换一般要经过哪 4 个步骤？
- (3) D/A、A/D 转换器各有哪些主要参数？



【本章小结】

- (1) 数字量与模拟量的相互转换电路是 D/A 和 A/D 转换电路。
- (2) A/D 转换器由采样—保持和量化—编码两部分组成。



【习题十】

10.1 求 8 位 A/D 转换器的分辨率。若该 A/D 转换器输出最大电压 10V，它能分辨的最小电压是多少？

10.2 图 10-1 所示的权电阻网络 D/A 转换器，设 $V_{\text{REF}} = -8\text{V}$, $R_{\text{F}} = R/2$ ，试求：

- (1) 当输入数字量 $D_3D_2D_1D_0 = 0001$ 时，输出电压的值；
- (2) 当输入数字量 $D_3D_2D_1D_0 = 1000$ 时，输出电压的值；
- (3) 当输入数字量 $D_3D_2D_1D_0 = 1111$ 时，输出电压的值。

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

《电工与电子技术基础》 读者调查表

尊敬的读者：

欢迎您参加读者调查活动，对我们的图书提出真诚的意见，您的建议将是我们创造精品的动力源泉。为方便大家，我们提供了两种填写调查表的方式：

1. 您可以登录 <http://yydz.phei.com.cn>，进入“读者调查表”栏目，下载并填好本调查表后反馈给我们。
2. 您可以填写下表后寄给我们（北京海淀区万寿路173信箱电子信息出版分社 邮编：100036）。

姓名：_____ 性别：☐ 男 ☐ 女 年龄：_____ 职业：_____
电话：_____ 移动电话：_____
传真：_____ E-mail：_____
邮编：_____ 通信地址：_____

1. 影响您购买本书的因素（可多选）：

☐封面、封底 ☐价格 ☐内容简介 ☐前言和目录 ☐正文内容
☐出版物名声 ☐作者名声 ☐书评广告 ☐其他_____

2. 您对本书的满意度：

从技术角度	<input type="checkbox"/> 很满意	<input type="checkbox"/> 比较满意	<input type="checkbox"/> 一般	<input type="checkbox"/> 较不满意	<input type="checkbox"/> 不满意
从文字角度	<input type="checkbox"/> 很满意	<input type="checkbox"/> 比较满意	<input type="checkbox"/> 一般	<input type="checkbox"/> 较不满意	<input type="checkbox"/> 不满意
从版式角度	<input type="checkbox"/> 很满意	<input type="checkbox"/> 比较满意	<input type="checkbox"/> 一般	<input type="checkbox"/> 较不满意	<input type="checkbox"/> 不满意
从封面角度	<input type="checkbox"/> 很满意	<input type="checkbox"/> 比较满意	<input type="checkbox"/> 一般	<input type="checkbox"/> 较不满意	<input type="checkbox"/> 不满意

3. 您最喜欢书中的哪篇（或章、节）？请说明理由。

4. 您最不喜欢书中的哪篇（或章、节）？请说明理由。

5. 您希望本书在哪些方面进行改进？

6. 您感兴趣或希望增加的图书选题有：

邮寄地址：北京市海淀区万寿路173信箱电子信息出版分社 张剑 收 邮编：100036
电 话：(010) 88254450 E-mail: zhang@phei.com.cn